

(51) Internationale Patentklassifikation ⁶ :G01J 9/00, G01B 11/24, H04N 3/15,
H01L 27/148

A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 98/10255

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum:

12. März 1998 (12.03.98)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE97/01956

(22) Internationales Anmeldedatum: 5. September 1997 (05.09.97)

(30) Prioritätsdaten:

196 35 932.5	5. September 1996 (05.09.96)	DE
197 04 496.4	7. Februar 1997 (07.02.97)	DE

(71)(72) Anmelder und Erfinder: SCHWARTE, Rudolf [DE/DE];
Kreuztaler Strasse 56, D-57250 Netphen (DE).(74) Anwälte: WEBER, Dieter usw.; Gustav-Freytag-Strasse 25,
Postfach 61 45, D-65051 Wiesbaden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten: AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CN, CU, CZ, DK, EE, ES, FI, GB, GE, GH, HU, IL, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZW, ARIPO Patent (GH, KE, LS, MW, SD, SZ, UG, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht

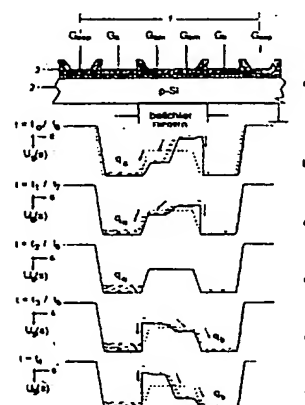
Mit internationalem Recherchenbericht.
Vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche zugelassenen Frist. Veröffentlichung wird wiederholt falls Änderungen eintreffen.

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR DETERMINING THE PHASE- AND/OR AMPLITUDE DATA OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR BESTIMMUNG DER PHASEN- UND/ODER AMPLITUDENINFORMATION EINER ELEKTROMAGNETISCHEN WELLE

(57) Abstract

The invention concerns a method and corresponding device for determining the phase- and/or amplitude data of an electromagnetic wave. In order to bring about the spatial depth resolution of the image data obtained with such a method, the method according to the invention comprises the following steps: an electromagnetic wave is beamed onto the surface of a photonic mixed element comprising at least one pixel, the pixel having at least two light-sensitive modulation light gates G_{am} and G_{bm} and associated accumulation gates G_a and G_b ; modulation light gate voltages $U_{am}(t)$ and $U_{bm}(t)$, which are configured as $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$ and $U_{bm}(t) = U_0 - U_m(t)$, are applied to the modulation light gates G_{am} and G_{bm} ; a direct voltage, whose magnitude is at least the same as that of the total of U_0 and the amplitude of the modulation voltage $U_m(t)$, is applied to the accumulation gates G_a and G_b ; the charge carriers produced in the space charge region of the modulation light gates G_{am} and G_{bm} by the incident electromagnetic wave are subjected, as a function of the polarity of the modulation light gate voltages $U_{am}(t)$ and $U_{bm}(t)$, to the potential gradient of a drift field and drift to the corresponding accumulation gate G_a or G_b ; and the charges q_a and q_b which have drifted to the accumulation gates G_a and G_b , respectively, are diverted. The corresponding photonic mixed element has at least one pixel which comprises at least two light-sensitive modulation light gates (G_{am} , G_{bm}) and accumulation gates (G_a , G_b) which are associated with the modulation light gates and are partitioned with respect to the incident electromagnetic wave. A plurality of photonic mixed elements can be assembled to form an array.



BEST AVAILABLE COPY

(57) Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle und eine entsprechende Vorrichtung. Um eine räumliche Tiefenauflösung der mit einem solchen Verfahren bei einer Vorrichtung gewonnenen Bildinformation zu erhalten, wird erfindungsgemäß ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem eine elektromagnetische Welle auf die Oberfläche eines mindestens ein Pixel aufweisenden photonischen Mischelementes eingestrahlt wird, wobei das Pixel mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} und zugeordnete Akkumulationsgates G_a und G_b aufweist; bei dem an die Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ angelegt werden, die als $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$ und $U_{bm}(t) = U_m(t)$ ausgestaltet sind; bei dem an die Akkumulationsgates G_a und G_b eine Gleichspannung angelegt wird, deren Betrag mindestens so groß wie der Betrag der Summe aus U_0 und der Amplitude der Modulationsspannung $U_m(t)$ ist; bei dem die in der Raumladungszone der Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} von der einfallenden elektromagnetischen Welle erzeugten Ladungsträger in Abhängigkeit von der Polarität der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und zum entsprechenden Akkumulationsgate G_a oder G_b driften; und bei dem die jeweils zu den Akkumulationsgates G_a und G_b gedrifteten Ladungen q_a und q_b abgeleitet werden. Das entsprechende photonische Mischelement hat mindestens ein Pixel, welches mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates (G_{am} , G_{bm}) und den Modulationsphotogates zugeordnete, gegenüber der einfallenden elektromagnetischen Welle abgeschottete Akkumulationsgates (G_a , G_b) aufweist. Mehrere photonische Mischelemente können zu einem Array zusammengeschaltet werden.

LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NK	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung
der Phasen- und/oder Amplitudeninformation
einer elektromagnetischen Welle

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle.

Der Begriff Phase steht hier allgemein für Phasenlaufzeit und für die je nach Signalform ebenfalls verwendete Bezeichnung Laufzeit.

- 10 Im folgenden wird von einer Lichtwelle anstatt von einer elektromagnetischen Welle gesprochen. Dieses bedeutet jedoch keine Einschränkung nur auf den Spektralbereich der sichtbaren elektromagnetischen Wellen, sondern dient lediglich der Vereinfachung.

- Zur Messung von Frequenzkomponenten nach Amplitude und Phase
15 in breitbandigen und hochfrequenten Signalen werden in der elektronischen Meßtechnik und Nachrichtentechnik häufig Phasendetektoren eingesetzt, die das unbekannte Signal mit einer Sinusschwingung multiplizieren bzw. mischen und den Gleichanteil, der bei Vorliegen einer Signalkomponente gleicher Frequenz durch Integration bzw.
20 Tiefpaßfilterung entsteht, bestimmen.

- Dieser Prozeß erzeugt die Korrelationsfunktion des unbekannten Signals mit dem Mischsignal für eine bestimmte, einstellbare relative Phasenlage. Durch Ändern der Mischfrequenz (Wobbeln) kann das unbekannte Signal in seine Spektralanteile zerlegt werden. Durch
25 mindestens 3 Phasenlagen der Mischfrequenz können Gleichanteil, Wechselamplitude und Phase der unbekannten Frequenzkomponente gleicher Frequenz bestimmt werden.

- Die Untersuchung entsprechender optischer Signale, die eine wachsende Bedeutung in der Meßtechnik und Nachrichtentechnik erlangt
30 haben, geschieht heute i.a. über breitbandige Photodetektoren als elektrooptische Wandler mit anschließender elektronischer Meßwertbestimmung - wie zuvor für elektrische Signale beschrieben.

2

Wegen des hohen Aufwandes werden diese Verfahren und die entsprechenden Meßgeräte meist nur ein- oder zweikanalig ausgeführt. Bei optischen Signalen sind jedoch häufig gleichzeitig sehr viele parallele Kanäle - insbesondere ganze Bildfolgen - mit hohen Frequenzanteilen zu vermessen.

Neben den spektralen Modulationseigenschaften von zweidimensionalen Lichtwellen interessiert zunehmend der schnelle Verlauf der Einhüllenden in Raum und Zeit. Außerdem möchte man schnell und genau 3D-Objekte z.B. über optische Radarverfahren vermessen, was infolge der Lichtgeschwindigkeit der Echosignale sehr schnelle Detektoren im Subnanosekundenbereich erfordert. Zugleich sollten sie als Detektorarray vorliegen, wenn man auf ein zeitraubendes Abscannen der aktiv oder passiv leuchtenden 3D-Objekte verzichten möchte.

In der Offenlegungsschrift DE 44 39 298 A1, von der die vorliegende Erfindung ausgeht, wird eine solche 3D-Kamera vorgeschlagen.

Fig. 10 soll zur Veranschaulichung dieser 3D-Kamera dienen, die auf dem Echolaufzeit- bzw Phasenlaufzeitverfahren beruht. Die von einem modulierten Lichtsender 107 und 103 abgestrahlte und von dem 3D-Objekt 100 reflektierte HF-modulierte Lichtwelle 101 enthält die gesamte Tiefeninformation in der Verzögerung der Phasenfront. Wird die einfallende Lichtwelle in der Empfangsapertur 102 nochmals mit einem zweidimensionalen, optischen Mischer 104 der gleichen Frequenz moduliert, was einem homodynem Misch- oder Demodulationsprozeß entspricht, so entsteht ein stationäres Hochfrequenz-Interferogramm.

Dieses HF-Interferogramm kann mit einer konventionellen CCD-Kamera 105 aufgenommen und mit einer Bildverarbeitung 106 weiterverarbeitet werden. Die Integration des Gleichanteils des Mischproduktes in der CCD-Photoladung entspricht der Bildung der Korrelationsfunktion der beiden Mischsignale. Die abstandsbezogenen Phasenverzögerungen durch die Echolaufzeiten sowie die Amplituden können pixelweise aus drei oder mehr Interferogrammen durch unterschiedliche Phasen der demodulierenden Mischfrequenz, z.B. 0° , 120° und 240°

oder 0° , 90° , 180° und 270° berechnet und somit das 3D-Tiefenbild rekonstruiert werden.

Der zweidimensionale optische Mischer 103 bzw. 104, der auch als räumlicher Lichtmodulator (Spatial Light Modulator SLM) bezeichnet wird, besteht dabei bspw. aus einer Pockelszelle, die eine Reihe schwerwiegender, in der Literatur beschriebener Nachteile aufweist.

Weitere Realisierungsmöglichkeiten bieten LCD-Fenster, die zwar billig, aber bzgl. der gewünschten Bandbreite um etwa den Faktor 1000 zu niedrig liegen.

- 10 Ebenfalls teuer und aufwendig ist der Einsatz einer sogenannten Mikrokanalplatte, wie sie in Bildverstärkern eingesetzt wird. Durch Modulation der an den Mikrokanälen angelegten Beschleunigungsspannung, die die Sekundärelektronenemission in den Mikrokanälen beeinflusst, kann die Verstärkung moduliert werden.
- 15 Weiterhin wird im Stand der Technik ein Vorschlag eines 2D-Korrektors auf der Basis eines CCD-Photodetektorarrays gemacht: "The Lock-In CCD -Two Dimensional Synchronous Detection of Light" von Spirig, Seitz et. al., veröffentlicht im IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 9, Sept. 1995, Seite 1705 - 1708. Dort wird ein Photopixel
- 20 über 4 Transferrates abgefragt, um die Phase sinusmodulierten Lichts zu ermitteln. Pro Sinusperiode werden mit den 4 Transferrates je eine äquidistante Probe entnommen, wodurch sich die Phase leicht berechnen läßt. Dieser Prozeß ist für die aufgezeigten Problemstellungen zu langsam, da das harmonische Lichtsignal zunächst während einer die
- 25 Bandbreite signifikant begrenzenden Abtastdauer aufintegriert wird. Erst dann erfolgt mit der Übernahme der gespeicherten Ladung als Abtastprobe der gewünschte Mischprozeß.

Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und/oder

30 Amplitudeninformation und damit der Einhüllenden einer Lichtwelle anzugeben, die ein einfacheres, breitbandigeres und preisgünstigeres Korrelatorkonzept und über eine vorgebbare Beleuchtung eine schnelle 3D-Objektvermessung ermöglichen.

Das zuvor aufgezeigte technische Problem wird nun durch das Verfahren nach Anspruch 1 sowie durch das photonische Mischelement nach Anspruch 14, durch die Mischelementanordnung nach Anspruch 20 und durch die Vorrichtung nach Anspruch 23 gelöst.

- 5 Das erfindungsgemäße Prinzip basiert auf einer durch die Modulationsphotogatespannung erzeugten Drift und Trennung der durch die Lichtwelle photogenerierten Minoritätsladungsträger im Material unterhalb von mindestens zwei benachbarten lichtempfindlichen Modulationsphotogates. Diese Ladungsträger driften dabei unter dem Einfluß der an den Modulationsphotogates anliegenden Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ je nach Polarität bzw. Phase zu den mit vorzugsweise der doppelten Gleichspannung U_a und U_b vorgespannten Akkumulationsgates. Die Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ liegen vorzugsweise komplementär an und setzen sich vorzugsweise aus einer Vorspannung U_0 und der im Gegentakt überlagerten Modulationsspannung $+U_m(t)$ bzw. $-U_m(t)$ zusammen. Die beiden Modulationsphotogates bilden zusammen vorzugsweise eine quadratische Fläche. Ein Pixel mit nur zwei Modulationsphotogates kann auch als Zweifachpixel bezeichnet werden.
- 10 15 20 Dieses erfindungsgemäße Prinzip setzt den photoelektrischen Quanteneffekt, verursacht durch elektromagnetische Wellen, voraus. Trotzdem wird - ohne daß dies als Einschränkung zu begreifen ist - immer von Lichtwellen gesprochen.
- 25 In der modulationsspannungsabhängigen bzw. phasenabhängigen Drift der photoerzeugten Ladungsträger zur rechten oder zur linken Seite der Modulationsphotogates ("Ladungsschaukel") besteht der eigentliche Misch- bzw. Multiplikationsprozeß. Dabei stellt die Ladungsdifferenz zwischen den so getrennten, unter den Akkumulationsgates gesammelten und an die Ausleseelektronik weitergeleiteten Ladungsträgern unter Berücksichtigung einer Integration in einer vorgegebenen Zeit ein Maß für die Korrelationsfunktion der Einhüllenden des einfallenden modulierten Lichtsignals und der Modulationsspannung $U_m(t)$ dar.
- 30

Gleichzeitig bleibt die Ladungssumme dieser zu den Akkumulationsgates gedrifteten und weitergeleiteten Ladungsträger von der Stellung der Ladungsschaukel unbeeinflusst und steht als entsprechende Pixelintensität bzw. als Pixelgrauwert zur Verfügung.

- 5 Um die relative Phase oder Zeitverzögerung der einfallenden Lichtwelle zu bestimmen, ist es - wie oben beschrieben - notwendig, drei Messungen für die drei Größen Gleichspannungs- und Wechselspannungsanteil sowie relative Phase durchzuführen. Daher ist eine Ausgestaltung des Pixels des photonischen Mischelementes mit drei lichtempfindlichen Modulationsphotogates möglich, die mit Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt werden, die drei verschiedene Phasenverschiebungen zur vom Sender ausgestrahlten Lichtwelle aufweisen.

- 15 Zur Bestimmung der Phase des Empfangssignals an jedem Pixel des photonischen Mischelementes aus den resultierenden Korrelationsamplituden werden zweckmäßiger Weise jedoch vier verschiedene Messungen bei vier verschiedenen Phasen des Mischersignals herangezogen. Dadurch erhält man eine Überbestimmung, durch die das Rauschen entscheidend verringert werden kann.

- 20 Durch die Gegentaktanordnung der Modulationsphotogatespannungen an zwei Modulationsphotogates pro Pixel werden jeweils zwei dieser Messungen gleichzeitig durchgeführt. Daher genügt es bspw. bei einer HF-Modulation, zwei um jeweils 90° verschobene Messungen bei $0^\circ/180^\circ$ wie auch bei $90^\circ/270^\circ$ Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ bzw. $U_{bm}(t)$ gegenüber der Phase des eingestrahlten Lichtes durchzuführen, um die notwendigen vier verschiedenen Meßwerte zu erhalten.

- 30 Besonders bevorzugt ist daher eine Anordnung, bei der das jeweils ein Pixel bildende photonische Mischelement aus vier symmetrisch angeordneten Modulationsphotogates besteht, wobei jeweils zwei sich gegenüberliegende Modulationsphotogates mit Gegentakt- bzw. um 180° phasenverschobenen Modulationsphotogatespannungen beaufschlagt sind, wobei die beiden im Zusammenhang mit dem Zweifachpixel zuvor beschriebenen um jeweils 90° verschobenen Messungen bei

0°/180° wie auch bei 90°/270° Phasendifferenz der Modulationsphotogatespannungen in diesem Fall gleichzeitig durchgeführt werden. Ein solches Pixel kann auch als Vierfachpixel bezeichnet werden.

5 Für eine Kalibrierung der Phasenverschiebung der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ ist es weiterhin in bevorzugter Weise möglich, einen Teil der vom Sender abgestrahlten Lichtwelle als Referenz direkt auf mindestens einen von mehreren Pixeln einer Anordnung von einer Mehrzahl von photonischen Mischelementen zu richten. Die von diesem direkt bestrahlten Pixel gewonnene Phasen- und Amplitudeninformation kann dann für die Kalibrierung benutzt werden bzw. für eine Justierung der Phasenverschiebung auf einen vorgegebenen Wert verwendet werden.

15 Umgekehrt kann bei fremderregter unbekannter Modulation der von einem aktiven Objekt abgestrahlten, einfallenden Lichtwelle mit Hilfe mindestens eines photonischen Mischelementes die Lichtwelle mit der bekanntlich hohen Auflösung eines Lock-in-Verstärkers vermessen werden. Dazu bildet das photonische Mischelement zusammen mit einem an die Stelle des Senders tretenden durchstimmbaren Modulationsgenerators einen Phasenregelkreis. Weiterhin findet sowohl bei der Lock-in-Verstärkung der Phase-Lock-Loop für bspw. für eine 20 HF-Modulation als auch der Delay-Lock-Loop für eine digitale Modulation Anwendung.

25 Für die Vermessung passiver Objekte kann die Modulation des abgestrahlten Lichtes sowie die entsprechende Modulation der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ bzw. $U_{bm}(t)$ auf verschiedene Weise durchgeführt werden. Zunächst kann eine kontinuierliche HF-Modulation durchgeführt werden, wobei wiederholt in Zeitabständen, die rückwirkend von der Pixelintensivität beeinflusst werden können, die Ladungsdifferenzen und die Ladungssummen zur Auswertung der Phasen- und Amplitudeninformation der Lichtwelle ausgelesen werden. 30

Vorteilhaft ist eine intermittierende Betriebsweise mit pulsförmiger HF-Modulation und Beleuchtung, z.B. um eine störende Hintergrundbeleuchtung jeweils kurzzeitig zu übertreffen. Dabei werden nur

die photoerzeugten Ladungen jeweils während des HF-Impulses integriert und anschließend ausgewertet.

Bei der Bestimmung insbesondere der Phasen- bzw. Laufzeitinformation von reflektierten Lichtwellen können zur Erhöhung der Phasen- bzw. Laufzeitauflösung die aus der Radartechnik bekannten HF-Impulskompressionsverfahren mit schmalen Korrelationsfunktionen, z.B. die Chirp-Technik eingesetzt werden. Dabei ist sowohl das Modulationssignal des einzelnen photonischen Mischelements als auch die mit vorgegebener Phasenbeziehung beleuchtende Lichtwelle des Senders und somit auch die mit der gesuchten Phasenbeziehung reflektierte Lichtwelle repetierend mit einem Chirp moduliert. Durch die Chirpmodulation werden in geeigneter Weise durch Einfügen einer einstellbaren Verzögerung zwischen der Modulationsphotogatespannung des photonischen Mischelements und des vom Sender abgestrahlten Lichts Mehrfachziele aufgelöst bzw. störende Mehrfachreflexionen einer beleuchteten Szene unterdrückt.

Als weitere Modulation steht die auch unten beschriebene Pseudo-Rausch-Modulation (Pseudo-Noise(PN)-Modulation) sowohl als Basisband-PN- als auch als HF-PN-Modulation zur Verfügung. Ein Samplingbetrieb mit Abtast- und Haltevorgängen (Sample-and-Hold) bei repetierenden Lichtsignalen ist ein Sonderfall der Mischung und Korrelation mit Nadelimpulsen. Auch hierfür sowie für andere Anwendungen gepulster Modulation kann das erfindungsgemäße photonische Mischelement vorteilhaft eingesetzt werden.

Die aufgezählten Modulationsarten sind an sich sämtlich aus dem Stand der Technik bekannt.

Die zu den Akkumulationsgates gedrifteten Ladungen können nun in verschiedener Weise weiterverarbeitet werden. Zum einen kann das photonische Mischelement in CCD-Technologie realisiert sein, wobei dann die Ladungen unterhalb der Akkumulationsgates gesammelt bzw. integriert und anschließend in herkömmlicher Weise bis zur CCD-Auleseschaltung z.B. im Dreiphasen-Schiebetakt verschoben und über eine p- oder n-Diffusion ausgelesen werden.

Zum anderen kann das photonische Mischelement in CMOS-Technologie als Aktivpixelelement mit pixeleigener Auslese- und Signalvorverarbeitungselektronik realisiert sein. Dabei wird praktisch die in der CCD-Technik übliche Ausleseschaltung jeweils beidseitig bis unmittelbar an die Modulationsphotogates herangeführt. Die Akkumulationsgates werden dabei vorzugsweise als gesperrte kapazitätsarme pn-Dioden ausgestaltet und leiten die ankommenden photogenerierten Ladungen vorzugsweise unmittelbar über die Elektroden G_a und G_b an die Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik zur dortigen Speicherung und Verarbeitung weiter.

Im letzteren Fall werden also die beiden Ladungsanteile der Ladungsschaukel kontinuierlich ausgelesen und können z.B. mit einem Ladungsverstärker praktisch rückwirkungsfrei auf je einer nachgeschalteten Kapazität gespeichert werden.

Es ist Stand der Technik, daß vor jeder neuen Messung die beteiligten und aufgeladenen Kapazitäten durch elektronische Reset-Schalter entladen werden und daß zweckmäßig die im Reset-Zustand gemessenen Fehlspannungen zur Korrektur der eigentlichen Meßwerte verwendet werden. Diese Anwendung des pixelweisen rückwirkungsfreien Auslesens hat den Vorteil, daß die gesamte Dynamik des photonischen Mischelementes und somit des Meßverfahrens erheblich gegenüber der Realisierung in CCD-Technologie gesteigert werden kann.

In weiter bevorzugter Weise ist es möglich, die Phasen- und Amplitudeninformation in einer Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik vorzugsweise als On-chip-Integration direkt zu berechnen. Solch ein anwendungsspezifischer optoelektronischer Chip (ASOC) bzw. solch ein Aktiv-Pixel-Sensor (APS) erhöht die Meßrate und ermöglicht eine pixelweise Vorverarbeitung der Phasen und/oder Amplituden.

Ein wichtiger Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt darin, daß die Modulation gleichzeitig mit der Ladungserzeugung und -trennung erfolgt. Mit anderen Worten finden die Detektion und die Mischung gleichzeitig und ohne zusätzlich rauschende und bandbegrenzende Zwischenstufen statt. Daher werden die im Stand der Technik unter

anderem auftretenden zeitlichen Driftfehler verhindert, die bei einer zeitlich und räumlich von der Detektion getrennten Modulation und Integration der Ladungen zwangsläufig auftreten und nicht zu unterdrücken sind.

- 5 Ein weiterer Vorteil der vorliegenden Erfindung liegt in der hohen Grenzfrequenz des photonischen Mischelements. Die Grenzfrequenz des Ladungstransfers durch die Gegentaktmodulationsspannung ist bezüglich der maximalen Driftlänge oder Transferstrecke, also der
10 Summenlänge der Modulationsphotogates, mit der Grenzfrequenz entsprechender MOS-Transistoren vergleichbar und erreicht somit den GHz-Bereich. Weiterhin werden durch die antisymmetrische Ladungsträgertrennung und -differenzbildung störende Gleichtaktsignale unterdrückt. Jedes nicht mit dem Modulationssignal korrelierende Stör-
15 signal, z.B. die Hintergrundbeleuchtung, wird in der Ladungsdifferenz unterdrückt, was zu einem hohen Signal-zu-Rauschverhältnis führt. Weiterhin tritt nur ein geringes Zeitdriften wegen der Zusammenfassung von Detektion, Mischen sowie Ladungsträgerintegration und -differenzbildung auf dem gleichen Chip auf. Zudem wird eine Zusammenfassung praktisch aller Meßfunktionen innerhalb einer einzi-
20 gen Halbleiterstruktur möglich.

Gegenüber dem Stand der Technik der DE 44 39 298 A1 mit der Verwendung von Pockelszellen als Modulatoren sind nur geringe Modulationsspannungen im 1 statt 1000 Volt-Bereich notwendig. Zudem wird durch eine 2D-Anordnung von erfindungsgemäßen photonischen Mischelementen eine große Apertur auf der Empfängerseite ge-
25 währleistet.

Für die Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation ist weiterhin kein kohärentes oder polarisiertes Licht erforderlich. Damit können weitere spezifische Eigenschaften der einfallenden
30 Lichtwellen durch Vorschalten selektierender Filter z.B. bezüglich Polarisierung und Wellenlänge des Lichts genutzt werden. Zusätzlich sind eine hohe Empfindlichkeit und ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch den Wegfall der nach dem Stand der Technik eingesetzten breitbandigen Photodetektorverstärker und elektronischen Mischer
35 gegeben.

Die spektrale optische Bandbreite der zu vermessenden Lichtwellen wird durch die spektrale Photoempfindlichkeit des in der Raumladungszone unter den Photogates verwendeten Materials bestimmt, d.h. z.B. bei Silizium etwa der Wellenlängenbereich 0,3 bis 1,1 μm , bei
5 InGaAs etw 0,8 bis 1,6 μm und bei InSb etwa 1 bis 5,5 μm .

Die photonischen Mischelemente können in einer beliebigen null-, ein- oder zweidimensionalen Anordnung angeordnet werden und bieten somit ein breites Spektrum an Anwendungsgeometrien. Dabei können mehrere 100.000 photonische Mischelemente parallel mit ei-
10 ner Modulationsbandbreite von z.B. 10-1000 MHz betrieben werden, so daß z.B. eine Kameraaufnahme einer 3D-Szene mit Bestimmung der Entfernungsinformation in jedem Bildpunkt extrem schnell realisierbar ist. Über die Ladungsdifferenzen der zu den Akkumulationsgates fließenden und ausgelesenen Ladungen wird pixelweise das Phasen-
15 bild $\phi(x,y)$ oder - im Falle modulierter Beleuchtung - das Entfernungsbild bzw. Tiefenbild mit dem Radiusvektor bzw. Voxelabstand $R(x,y)$ bestimmt. Die entsprechenden Ladungssummen ergeben den konventionellen Pixelgrauwert $A(x,y)$. Beide können zum skalierten Grauwertbild bzw. zum 3D-Bild $A(x,y,z)$ zusammengefaßt werden.

20 Die 3D-Bild-Wiederholrate liegt dabei im Bereich von etwa 10 Hz bis über 1000 Hz und hängt von der Anzahl der verwendeten photonischen Mischelemente und der Lichtintensität ab. Durch zusätzliche Farbfilter ist es möglich, die üblichen Farbwerte Rot(x,y), Grün(x,y) und Blau(x,y) des Entfernungsbildes $R(x,y)$ zu gewinnen.

25 Durch den integrierten Aufbau von Mischung und Ladungsträgerintegration wird nicht zuletzt auch ein einfacher Aufbau des photonischen Mischelementes erreicht. Schließlich muß kein besonderer Aufwand im Empfangskanal geleistet werden, denn eine konventionelle Abbildungsoptik reicht für die Abbildung der einfallenden, ggfs. reflektier-
30 ten Lichtwelle aus, sofern eine ein- oder zweidimensionale Szene und nicht nur ein Punkt aufgenommen werden soll. Durch synchrones Zoomen der Sende- und Empfangsoptik ist die Meßvorrichtung an unterschiedliche 3D-Szenen flexibel anpaßbar.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren und dem entsprechenden Misch-
element bzw. einer Anordnung von mehreren Mischelementen ist es
zweckmäßig, wenn die Pixelphase bzw. die Pixellaufzeit und die Pixelhel-
ligkeit direkt mit Hilfe einer Aktiv-Pixel-Sensor-Struktur (APS) ermittelt und
dann vorzugsweise über eine auf demselben Chip untergebrachte Multiplex-
struktur (sogenannte On-Chip-Multiplexstruktur) wahlfrei oder auch seriell
ausgelesen wird. Dies erhöht die Verarbeitungsgeschwindigkeit und
vermindert auch die Zahl der weiteren benötigten Komponenten.

Wenn weiterhin die Pixelhelligkeit als Summe der Ladungen der zugehörigen
Akkumulationsgates als Grauwertbild ausgewertet wird, so ist eine Ausgestal-
tung der Erfindung besonders bevorzugt, welche, im Fall einer Hinter-
grundbeleuchtung, d.h. einer nicht modulierten Beleuchtung, die neben der
modulierten Beleuchtung vorhanden ist, die durch diese zusätzliche
Beleuchtung hervorgerufenen Ladungen an den Akkumulationsgates
rechnerisch eliminiert, indem die Differenz zwischen den Grauwertbildern
gebildet wird, die man zum einen mit eingeschalteter modulierter Beleuch-
tung und zum anderen ohne die modulierte Beleuchtung, d.h. nach Aus-
schalten der modulierten Lichtquelle erhält. In dieser Grundhelligkeit bzw.
diesem Sockelbetrag der Ladungen an den Akkumulationsgates ist keine
Korrelationsinformation enthalten, so daß die tatsächliche Korrelations-
information nach dem Subtrahieren dieses Sockelbetrages deutlicher
hervortritt.

Wie bereits erwähnt, ist es selbstverständlich zweckmäßig, wenn mehrere der
Mischelemente entweder in einer linearen, einer flächigen oder in einer
räumlichen Feldanordnung verwendet werden. Unter einer "linearen"
Feldanordnung soll dabei nicht nur ein Feld von Mischelementen verstanden
werden, welche in einer geraden Reihe neben- bzw. hintereinander angeord-
net sind, sondern generell ein Feld von Mischelementen, welche entlang einer

Linie angeordnet sind, wobei diese Linie gerade oder auch gekrümmt verlaufen kann. Auch bei den flächigen Anordnungen können nicht nur ebene Mischelementanordnungen in Form einer rechtwinkligen Matrix vorgesehen werden, wenn diese auch aus praktischen Gründen zu bevorzugen sein mag, sondern die Mischelemente können im Prinzip nach einem beliebigen Muster und auch auf einer gekrümmten Fläche, zum Beispiel auf der Innenfläche einer Kugelschale, angeordnet werden. Ebenso sind auch Feldanordnungen der Mischelemente auf abgeknickten Flächen, d.h. gleichzeitig auf zwei Flächen, die einen Winkel miteinander einschließen, verwendbar und für bestimmte Anwendungen sinnvoll. Derartige Anordnungen fallen unter den Begriff der "räumlichen Feldanordnung".

Bei solchen Feldanordnungen aus mehreren, gegebenenfalls mehreren hundert oder tausend Mischelementen, ist eine Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorteilhaft und zweckmäßig, bei welcher mindestens eines der Pixel bzw. Mischelemente direkt mit einem Teil der als Beleuchtung dienenden, intensitätsmodulierten elektromagnetischen Welle bestrahlt wird, wobei das so erhaltene Meßergebnis an diesem mindestens einen Pixel zum Kalibrieren der übrigen Phasen und Helligkeitsergebnisse verwendet wird. Dabei ist es zweckmäßig, wenn ein solches Referenzpixel vom Sender mit wahlweise unterschiedlichen Intensitäten beaufschlagt wird, bzw. für den Fall, daß mehrere Referenzpixel verwendet werden, daß jedes dieser Pixel mit einer anderen Intensität beaufschlagt wird. Hierdurch kann man Fehler vermeiden, die sich möglicherweise aufgrund des großen Dynamikumfangs der Meßsignale einstellen könnten.

Bei einer ein- oder mehrdimensionalen Mischelementanordnung der vorstehend genannten Art ist es zweckmäßig, wenn die Pixel in MOS-Technik auf einem Siliziumsubstrat ausgeführt und mit einer Multiplexstruktur, vorzugsweise mit einer CCD-Struktur, auslesbar sind.

Es versteht sich, daß die erfindungsgemäßen Mischelemente ohne weiteres für die Verwendung in einer digitalen Photokamera oder Videokamera geeignet sind. Hierzu muß lediglich eine entsprechende Mischelementanordnung (zum Beispiel in Form einer rechteckigen Matrix) mit integrierter Empfangsoptik, Auswerteelektronik und einer Signalverarbeitung für die Differenzsignale, die Summensignale und die zugehörigen Referenzsignale vorgesehen werden, zusammen mit einem digitalen Speicher für das daraus berechnete Grauwertbild und das Laufzeit- bzw. Entfernungsbild. Hinzu kommt noch ein entsprechender Sender bzw. eine entsprechende Lichtquelle, welche eine dreidimensionale Szene mit modulierten elektromagnetischen Wellen bzw. moduliertem Licht bestrahlt, sowie eine auf die Empfangsoptik entsprechend einstellbare Sendeoptik, wobei alle diese Komponenten zu einer kompakten Einheit als digitale Kamera zusammengefaßt sind. Dabei besteht der Unterschied zwischen einer digitalen Photokamera und einer digitalen Videokamera im wesentlichen nur darin, daß bei einer entsprechenden Videokamera eine relativ große Zahl von Bildern in entsprechend kurzen Zeitabständen aufgenommen und gespeichert werden muß, so daß entsprechende Einrichtungen zur Speicherung und Wiedergabe entsprechender Bildfolgen vorgesehen werden müssen.

Es versteht sich, daß darüberhinaus in allen Anwendungen die Beleuchtung bzw. Bestrahlung einer Szene mit moduliertem Licht aus verschiedenen Spektralbereichen erfolgen kann, so daß man mit den so gewonnenen Farbauszügen der Bilder vollständige Farbbilder mit der gleichzeitig gelieferten räumlichen Tiefeninformation erfassen und rekonstruieren kann.

Für eine höhere Bandbreite und zum Beispiel auch für eine verbesserte Kantenerfassung kann die Verwendung einer Mikrolinsenoptik zweckmäßig sein, bei welcher jedem Mischelement bzw. Pixel eine Mikrolinsenoptik zugeordnet ist, die das einfallende Licht auf den zentralen Bereich des Pixels

reduziert, so daß Abweichungen von dem idealen Potentialverlauf an den Modulationsgates, die vor allem in den Randbereichen der photoempfindlichen Flächen auftreten, praktisch ausgeblendet werden. Außerdem kann durch eine mit Hilfe der Mikrolinsenoptik erzeugte unscharfe Abbildung in der Detektorebene der Mischelemente verhindert werden, daß durch die Abbildung von Kanten, deren Abbildung zufällig in der Mitte zwischen den beiden Pixelhälften verläuft, Differenzladungen an den Akkumulationsgates erzeugt werden, die eine Korrelation bzw. eine falsche Tiefeninformation vortäuschen.

Feldanordnungen mit den erfindungsgemäßen Photomischelementen eignen sich auch gut für die Erfassung und gegebenenfalls auch Verfolgung vorgegebener ein-, zwei- oder dreidimensionaler Strukturen im Blickfeld der betreffenden Anordnung und unter zusätzlicher Berücksichtigung der Tiefeninformation bzw. des Objektabstandes des gesuchten und gegebenenfalls zu verfolgenden Objektes.

Konkret wird durch eine wahlweise Bestimmung der Amplituden und der Verschiebung der X-, Y- und der Zeitkoordinate T der Modulationssignale um $(\Delta X, \Delta Y, \Delta T)$ (wobei X- und Y zwei linear unabhängige Koordinaten definieren, die die Ebene einer Mischelementmatrix aufspannen und mit der Zeit T die Laufzeitverzögerung der Modulationssignale gemeint ist) eine dreidimensionale Korrelation durchgeführt, wodurch ein vorgegebenes, dreidimensionales Objekt im Raum gesucht, erfaßt und gegebenenfalls verfolgt wird.

Das erfindungsgemäße Photomischelement hat darüberhinaus auch ein breites Anwendungsfeld auf dem Gebiet der optischen Datenübertragung. Dabei wird das erfindungsgemäße Photomischelement in einem herkömmlichen optischen Signalempfänger, gegebenenfalls inklusive Signalregeneration, einfach

anstelle einer Photodiode verwendet, wobei die Form des Modulationssignals optimal an die Signalform angepaßt ist und die Phase des Modulationssignals in einem Phasenregelkreis ebenfalls optimal an die Phasenlage des Empfangssignals angepaßt ist. Mit anderen Worten, der Takt wird aus dem Signal selbst gewonnen und zur optimalen Wichtung des Empfangssignales benutzt, wodurch das Signal in optimaler Weise von dem störenden, verrauschten Untergrund separiert wird. Gegenüber herkömmlichen Photodioden kann auf diese Weise die Empfindlichkeit und Genauigkeit in der optischen Datenübertragung erheblich verbessert werden. Dies könnte insbesondere auch eine erhebliche Verlängerung der optischen Übertragungsstrecken ohne Zwischenverstärkung und eine höhere Zahl paralleler Nachrichtenkanäle im Zeit-, Frequenz- und Codemultiplex ermöglichen.

Schließlich ist das erfindungsgemäße Photomischelement zum Beispiel auch einsetzbar in Positionserfassungssystemen auf optischer Basis, wobei die Funktionsweise im Prinzip ähnlich ist wie bei dem bekannten GPS-System, welches mit Hilfe von Satellitensendern, die die codierte Abstrahlung von Signalen ermöglichen, eine sehr genaue Positionsbestimmung erlauben. Bei einem entsprechenden optischen Positionserfassungssystem wäre der vom GPS-System bekannte Satellitensender durch eine entsprechend näher an dem Objekt, dessen Position zu bestimmen ist, angeordnete, breit streuende, modulierte Lichtquelle, zum Beispiel mittels Laserdioden und Streuoptik zu ersetzen, während der Empfänger von einem oder mehreren Photomischelementen auf dem Objekt gebildet wird, vorzugsweise von mehreren in verschiedenen Richtungen ausgerichteten Photomischelementen, um die Signale von an verschiedenen Punkten stationär angeordneten Lichtquellen mit verschiedenen Modulationen zu erfassen. Die codierte Modulation ermöglicht dabei eine eindeutige Zuordnung von stationären Lichtquellen und von dem Objekt, dessen Position bestimmt werden soll, sowie den zugehörigen Signallaufzeiten, mit deren Hilfe die Position bestimmt wird.

Eine weitere Anwendung ist die eines Demultiplexers für die optische Datenübertragung. Die Codierung in Form einer speziellen Modulation und die zugehörige Korrelation mit Hilfe des Photomischelementes ermöglicht dabei eine eindeutige Zuordnung verschiedener Kanäle.

5 Eine weitere Anwendung und Ausnutzung der hohen Phasenempfindlichkeit der erfindungsgemäßen Photomischelemente liegt in der Messung des Sagnac-Effektes, d.h. der Laufzeit- bzw. Phasenverschiebung von Lichtwellen in rotierenden Bezugssystemen. Hierzu wird modulierte Licht in eine vorzugsweise in mehrere Windungen gelegte Lichtleitfaser eingekoppelt und der Ausgang der Lichtleitfaser beleuchtet eines der erfindungsgemäßen Photomischelemente. Die Modulationsgates dieses Mischelementes werden mit derselben Frequenz moduliert wie die eingekoppelten Lichtwellen, so daß das Korrelationsergebnis in Form der Ladungsverteilung an dem Photomisch-
10 element ein Maß für die aktuelle Frequenz- bzw. Phasenverschiebung liefert. Während jeder Drehung des Bezugssystems, bei welcher die Rotationsachse nicht in der Ebene der Windungen des Lichtwellenleiters liegt, ändert sich Frequenz und Laufzeit und damit auch die Phasenlage und werden automatisch von dem Photomischelement erfaßt. Bemerkenswert ist dabei, daß mit dem Photomischelement derartige Faserkreisel-Kompaßsysteme auf der Basis des Sagnac-Effektes jetzt mit Hilfe von inkohärentem Licht realisiert werden können, die keine Probleme hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität verursachen, da die entsprechenden Fehlerquellen nach dem Stand der Technik, der Hochfrequenzverstärker nach dem optischen Detektor und der
20 elektronische Mischer vollständig entfallen.

Zusätzlich kann neben der mit einem solchen System ermöglichten absoluten Richtungsmessung auch noch die Geschwindigkeitsmessung eines bewegten Objektes mit Hilfe des erfindungsgemäßen Photomischelementes erfolgen, indem zum Beispiel ein Teil der Lichtwellen in einem Strahlteiler vor
30

Einleitung in den Lichtwellenleiter ausgeblendet und auf ein ruhendes Objekt gerichtet wird, wobei das von dem ruhenden Objekt reflektierte Licht von einem entsprechenden Photomischelementempfänger aufgefangen und in der bereits mehrfach beschriebenen Art und Weise - hier bezüglich der Doppler-Frequenzverschiebung - ausgewertet wird.

Je nach Bedeutung der zusätzlichen Tiefeninformation eines Zeilen- oder Matrixbildes können in einem CCD-, CMOS- oder TFA (Thin Film on ASIC)-Bildsensor eine bestimmte Anzahl von Photomischelementen in der entsprechenden Technologie integriert werden.

Weiterhin kann bei der Anwendung einer erfindungsgemäßen 3D-Zeilen- oder Matrixkamera der zusätzliche Einsatz einer herkömmlichen 2D-Kamera sinnvoll sein, wobei eine vorzugsweise spektrale Zuordnung und Zuführung des aktiven modulierten Beleuchtungsanteils zur 3D-Kamera und des übrigen unmodulierten Beleuchtungsanteils vorzugsweise mit einem Strahlteiler vorgenommen wird.

Für Anwendungen der Photomischelemente zur 3D-Vermessung auch für größere Entfernungen, für die die modulierte Beleuchtung zu schwach ist, kann eine Kombination aus mindestens zwei 3D-Zeilen- oder Matrixkameras Anwendung finden, bei der im Nahbereich erfindungsgemäß nach dem Laufzeitprinzip und im Fernbereich nach dem Triangulationsprinzip mit i.a. vorhandener Hintergrundbeleuchtung vermessen wird.

Die Tiefenvermessung im Nahbereich geschieht dabei wie bisher beschrieben, hier allerdings parallel über mindestens zwei Kameras.

Für die Tiefenvermessung im Fernbereich werden die über den PMD-Chip-Mittelpunkt gebildeten optischen Achsen der Kameras auf einen gemein-

5 samen Schnittpunkt im zu vermessenden Volumenbereich gerichtet, zum Beispiel durch entsprechende PMD-Chip-Verschiebung in horizontaler und vertikaler Richtung und bezüglich der PMD-Chip-Abstände, wobei gleichzeitig die Fokussierung der Kameraoptiken auf diese Entfernung eingestellt wird. Bei entsprechendem vorherigen Abgleich stimmen dann die Pixelhelligkeitswerte in diesem Volumenbereich höchster Tiefenschärfe überein.

10 Zur Erfassung und Identifikation der Objekte in diesem Volumenbereich wird bei Korrespondenz der Pixelamplituden das Summenbild der Photomisch-elemente durch eine kurzzeitig angelegte Modulationsgleichspannung bezüglich des Differenzbildes aufgeblendet, den eingestellten Entfernungsdaten zugeordnet und ausgewertet, während die nicht korrespondierenden Pixelamplituden im Differenzbild durch eine zu Null gesetzte Modulationsspannung $U_{ma} = U_{mb} = 0$ ausgeblendet bleiben.

15 Auf diese Weise wird durch Winkel-Scannen die 3D-Szene auch außerhalb der Reichweite der modulierten Senderbeleuchtung vermessen, wobei die erforderlichen Winkel sowohl durch entsprechende Verschiebung der PMD-Chips als auch durch Drehen der einzelnen Stereokameras und/oder durch
20 Schwenken der gesamten Anordnung erreicht wird.

Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, von denen hier nur einige teils ausführlich beschrieben, teils nur knapp angedeutet worden sind, finden sich auch in der folgenden Auflistung, in der weitere Anwendungsmöglichkeiten
25 angegeben sind, deren weitere Beschreibung den Rahmen der vorliegenden Anmeldung sprengen würde, wobei auch die folgende Auflistung keineswegs erschöpfend ist.

30 Im einzelnen sind Anwendungsmöglichkeiten auf den folgenden Gebieten denkbar und sinnvoll:

- Digitale 3D-Photokamera,
- Digitale 3D-Videokamera,
- Gefahrenraumüberwachung
- Sicherheitstechnik und "Intelligentes Haus",
- 5 - Insassendetektion- und Identifizierung im Automobil, "intelligenter Airbag",
- Elektronischer 3D-Rückspiegel,
- Erkennung der Verkehrssituation im Straßenverkehr
- Autonome Fahrzeugnavigation,
- 0 - Inkohärenter Faserkreisel und Dopplergeschwindigkeitsmessung,
- Steuerung autonomer Transportfahrzeuge,
- Industrielle Reinigungsroboter,
- Personenidentifikation, Authentifizierung, Kontrolle der Zugangsberechtigung,
- 15 - Identifikation von Objekten, zum Beispiel Fahrzeugen,
- Fertigungsüberwachung, Materialprüfung, 100%-Qualitätsprüfung,
- Elektronisches "3D-Auge" für die Roboterhand, robust, klein, All-Solid-State,
- Fahrzeug-Eigengeschwindigkeits- und Streckenmessung, Straßenzu-
- 20 standserkennung, Verkehrsstauung,
- Gleisfreimeldung, Fahrdrachtüberwachung in der Bahntechnik,
- Medizintechnik, Endoskopie,
- CDMA-Technik für die optische Freiraum- oder Leitungskommunikation,
- 25 - Interaktive 3D-Kommunikation zum Beispiel im Multimediabereich,
- 3D-Vermessung bewegter Objekte mit einer Zeile aus Photomischelementen.

30 Dabei sind die folgenden Vorteile der Photomischelemente der vorliegenden Erfindung hervorzuheben (im folgenden abgekürzt als "PMD" für "Photonic

Mixer Device"):

1. PMD vereint: Detektion, Gegentaktmischung und Integration auf kleinstem Raum $1/100 - 1/1000 \text{ mm}^2 \Rightarrow$ Elektrooptische Korrelation.
2. 2-fach/4-fach-PMD: Ersatz für 2 bzw. 4 aufwendige Breitbandverstärker mit hoher Dynamik und Gruppenlaufzeitkonstanz sowie für 2 bzw. 4 elektronischen Mischer.
3. Die hohe elektronische Übersprechempfindlichkeit zwischen Sender und Empfänger entfällt.
4. Hohe Integrierbarkeit mit einigen 100.000 parallelen elektrooptischen Modulatoren.
5. Eine PMD-3D-Photo- oder Videokamera ist voll integrierbar, klein, leicht, robust und durch eine ZOOM-Optik für Lichtsender und Empfänger flexibel anpaßbar. Meßvolumen für natürliche Oberflächen, Entfernungen von ca. 20 cm bis 50 m bei Öffnungswinkeln von ca. 5° bis 50° .
6. Extrem schnelle 3D-Bildaufnahme im 10 Hz - 1000 Hz-Bereich. Empfindlichkeit und S/N-Verhältnis entsprechen heutigen CCD- bzw. CMOS-Kameras.
7. Die erwartete Tiefenauflösung beträgt etwa 0,5 mm bis 50 mm je nach Meßzeit, Beleuchtungsintensität, Optik und Abstand durch optimale Referenz.
8. Maximale Bandbreite je nach Pixelgröße bis in den GHz-Bereich.
9. Modulationsspannungen im Bereich kleiner 1 Volt.
10. Es wird kein kohärentes, polarisiertes oder schmalbandiges Licht benötigt und der Spektralbereich richtet sich nach dem lichtempfindlichen Material (z.B. bei InSb bis $5,5 \mu\text{m}$).
11. Gleichzeitige Aufnahme des 3D-Tiefenbildes und des 2D-Grauwertbildes eröffnet durch Datenfusion eine optimierte Auswertung des 3D-Grauwertbildes (bzw. 3D-Farbbild).

12. Die Ausleseschaltung erlaubt durch intensitätsabhängige Variation der Integrationszeit T_i eine Erhöhung der Dynamik um ca. 8 Bit (Faktor 256).

22

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert, wobei auf die Zeichnung Bezug genommen wird. In der Zeichnung zeigt

- Fig. 1 a) im Querschnitt ein Pixel eines ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes in CCD-Technologie sowie b) - f) die Potentialverteilung $U_S(t)$ für die verschiedenen Phasen bzw. Zeiten der beiden komplementären Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$,
- Fig. 2 eine Blockbilddarstellung zweier linear angeordneter Pixel in CCD-Technologie einschließlich einem Teil einer Interline-Transfer-Auslesevorrichtung,
- Fig. 3 im Diagramm die Intensitätsverteilung des eingestrahlichten Lichtes und die Potentialverläufe der Spannungen $U_{sep}(t)$, $U_a(t)$, $U_{am}(t)$, $U_{bm}(t)$ und $U_b(t)$ im Falle einer HF-Modulation,
- Fig. 4 im Diagramm die Charakteristik des Misch- und Korrelationsergebnisses des photonischen Mischelements in Form der gemittelten zu den Akkumulationsgates driftenden photogenerierten Ladungsträgerströme \bar{i}_a und \bar{i}_b bei einer HF-Modulation in Abhängigkeit von der relativen Phasen- bzw. Laufzeitverschiebung $\varphi_{opt} = \omega_m \tau$,
- Fig. 5 im Diagramm für eine PN-Modulation a) das Modulationssignal, b) die Charakteristik des Misch- und Korrelationsergebnisses sowohl für eine Zweifachpixel (nur \bar{i}_a und \bar{i}_b) als auch für ein Vierfachpixel mit \bar{i}_c und \bar{i}_d bei einer Verzögerung des Modulationssignals für das 3. und 4. Modulationsgate cm und dm von T_b sowie c) die für die Entfernungsauswertung relevanten Differenzwerte $\Delta\bar{i}_{ab} + \Delta\bar{i}_{cd} = \bar{i}_a - \bar{i}_b + (\bar{i}_c - \bar{i}_d)$ und $\Delta\bar{i}_{ab} - \Delta\bar{i}_{cd} = \bar{i}_a - \bar{i}_b - (\bar{i}_c - \bar{i}_d)$,
- Fig. 6 a) im Querschnitt ein Pixel eines zweiten Ausführungsbeispiels in CCD-Technologie eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit einem mittleren

Modulationsphotogate G_0 sowie die Potentialverteilungen unter den Modulationsphotogates und Akkumulationsgates b) für eine positive und c) für eine negative Modulationsspannung $U_m(t)$,

- 5 Fig. 7 a) im Querschnitt ein Pixel eines dritten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes sowie b) - f) die Potentialverteilungen für die verschiedenen Phasen analog zu Fig. 1,
- 10 Fig. 8 in einer Draufsicht ein Pixel eines vierten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates und vier Akkumulationsgates, als Vierfachpixel bezeichnet,
- 15 Fig. 9 in einer Draufsicht ein Pixel eines fünften Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates und vier Akkumulationsgates und einem zentralen symmetrischen mittleren Gate G_0 ,
- 20 Fig. 10 eine schematische Darstellung einer aus dem Stand der Technik bekannten Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle,
- 25 Fig. 11 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle für HF-Modulation,
- 30 Fig. 12 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer Lichtwelle z.B. für PN-Modulation oder Rechteckmodulation,
- 30 Fig. 13 a) im Querschnitt ein Pixel eines sechsten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit Pixelauslese- und -vorverarbeitungselektronik in CMOS-Technologie sowie b) und c) die Potenti-

alverteilung analog zu Fig. 6 für zwei Phasen bzw. Polaritäten der Modulationsphotogatespannung und

Fig. 14 in einer Draufsicht ein Pixel eines siebten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes mit vier Modulationsphotogates, vier Akkumulationsgates sowie einem kreuzförmig ausgestalteten mittleren Gate G_0 , vorzugsweise für digitale Modulation.

Fig. 1a zeigt den Querschnitt eines einzelnen Pixels 1 eines photonischen Mischelementes am Beispiel einer CCD-Struktur. Dabei umfaßt das photonische Mischelement neben dem Pixel 1 die für die Spannungsversorgung und die Signableitungen notwendigen Strukturen. Die äußeren Gates G_{sep} dienen lediglich zur elektrischen Abgrenzung dieses Pixels gegenüber benachbarten Strukturen.

Die in Fig. 1 gezeigte Ausführung ist auf einem p-dotierten Siliziumsubstrat 2 ausgeführt. Der Misch- oder Multiplikationsvorgang des vorgeschlagenen Konzepts sei zunächst für reine CW-Hochfrequenzmodulation betrachtet.

Bezogen auf den Querschnitt zeigt Fig. 1b-f schematisch die Potentialverteilungen für verschiedene Phasen des Mischprozesses. Die mittleren Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} stellen den lichtsensitiven Teil dar und befinden sich im Inversionszustand. Zusätzlich zu einer positiven Vorspannung U_0 an der leitfähigen aber optisch teiltransparenten oberen Abdeckung z.B. aus Poly-Silizium werden sie mit den überlagerten Gegentaktspannungen $U_m(t)$ betrieben. Es ergeben sich die Modulationsspannungen $U_{am}(t) = U_0 + U_m(t)$ bzw. $U_{bm}(t) = U_0 - U_m(t)$.

Diese verursachen multiplikativ eine Separierung der durch die Photonen der einfallenden Lichtwelle in der Raumladungszone erzeugten Minoritätsladungsträger unmittelbar unterhalb der Isolatorschicht 3, z.B. aus Siliziumoxyd oder Siliziumnitrid. Diese Ladungsträger (im Beispiel Elektronen) driften unter dem Einfluß der modulierenden Gegentaktspannung zu den eng benachbarten positiven Akkumulationsgates G_a oder G_b und werden dort aufintegriert während die Majo-

ritätsladungsträger bzw. Löcher zum Masseanschluß des p-Si-Substrats fließen. Auch eine rückwärtige Beleuchtung ist möglich.

Fig. 2 zeigt eine Aufsicht von zwei Pixeln 1 des erfinderischen photo-
nischen Mischelementes einschließlich eines Teils einer Interline-
5 Transfer-Auslesevorrichtung 7 in Form eines 3-Phasen-CCD-Schiebe-
registers, an dessen einem Ende sich die Ausleseelektronik mit einem
Diffusionsübergang für die serielle Weiterverarbeitung der durch die
Korrelation gewonnen Ladungswerte befindet. Nach einer vorgebbaren
Zeit T für die Ladungsakkumulation unter allen Akkumulations-
10 gates der Zeile werden z.B. bei Pixel Nr. n die Ladungen q_a und q_b unter
 G_a und G_b über das Transfergate TG_a bzw. TG_b auf das 3-Phasen-
Ausleseschieberegister gegeben. Die begrenzenden Separationsgates
 G_{sep} schirmen das Korrelationspixel gegen unerwünschte äußere Ein-
flüsse ab und liegen vorzugsweise auf Massepotential.

15 In Fig. 3 sind die zu Fig. 1 gehörenden Sannungsverläufe dargestellt.
Die Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} werden mittels der in Fig. 3
dargestellten Modulationsphotogatespannungen, die eine gegenpha-
sige HF-Modulationsspannung $U_m(t)$ enthalten, angesteuert, die wie
folgt beschrieben sind:

$$20 \quad U_{um} = U_0 + U_m \cos(\omega_m t) \quad (1 a)$$

und

$$U_{hm} = U_0 + U_m \cos(\omega_m t - 180^\circ) = U_0 - U_m \cos(\omega_m t) \quad (1 b)$$

In Fig. 1b-f ist die Potentialverteilung $U_s(s)$ in der Raumladungszone
über der räumlichen Ausdehnung s eines repräsentativen Pixels 1 für
25 alle beteiligten Gates dieses Pixels in der zeitlichen Sequenz von t_0 bis
 t_3 für die Dauer einer Periode T_m des HF-Modulationssignals anschau-
lich dargestellt. An den Akkumulationsgates G_a und G_b sorgt eine rela-
tiv hohe positive Spannung für die Ansammlung der photogenerier-
ten Ladungsträger, nachdem diese nach Maßgabe und Polarität der
30 Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ entweder vor-
wiegend zur linken oder zur rechten Seite des in Fig. 1 im Querschnitt
gezeigten Pixels 1 gedriftet sind. Dieser Vorgang wirkt sich dann in be-
sonderer Weise aus, wenn die Lichtmodulation und die Modulations-

26

photogatespannung $U_{am}(t)$ die gleiche Frequenz aufweisen. Dann entsteht je nach der Phasendifferenz φ_{opt} eine mittlere Vorzugsrichtung der Ladungsträgerdrift zu den Akkumulationsgates G_a und G_b . Die zugehörigen gemittelten Ströme werden durch \bar{i}_a und \bar{i}_b beschrieben.

- 5 Der zugrundeliegende Korrelationsprozeß kann mathematisch so beschrieben werden: In der Empfangsebene des im allgemeinsten Fall 2D-Arrays photonischer Mischelemente ist $z = 0$ und die einfallende modulierte Lichtwelle wird dort allgemein durch $P_{opt}(x,y,t-\tau)$ beschrieben. Hier wird sie über die photogenerierten Ladungsträger mit dem dort
- 10 wirkenden Gegentakt-Modulationssignal, in allgemeiner Form durch $U_m(x,y,t)$ beschrieben, bezüglich der Ladungsdifferenzen der beiden Akkumulationsgates annähernd multiplikativ und integrativ verknüpft. Die entsprechende Korrelationsfunktion $\varphi_{U_m, P_{opt}}(x,y,t)$ wird z.B. für alle gemittelten Differenzen der Ladungsträgerdrifts
- 15 $\Delta q_{ab} / T = \Delta \bar{i}_{ab} = \bar{i}_a - \bar{i}_b$ (mit T = Integrationszeit) zu den Akkumulationsgates G_a und G_b im allgemeinsten Fall ortsabhängig als Dreifachfaltung beschrieben:

$$\varphi_{U_m, P_{opt}}(x, y, \tau) = k_1 \cdot U_{am}(-x, -y, -\tau) *** P_{opt}(x, y, \tau) = k_2 \cdot \Delta \bar{i}_{ab}(x, y, \tau) \quad (2)$$

- mit der Laufzeitdifferenz $\tau = \varphi_{opt} / \omega_m$, der Modulationskreisfrequenz
- 20 ω_m und den strukturabhängigen, jedoch für das Funktionsprinzip unwesentlichen Konstanten k_1 und k_2 .

- Das erfindungsgemäße photonische Mischelement löst diese Aufgabe mit hoher Orts- und Zeitauflösung durch den schnellen separierenden Ladungstransport der Photoelektronen und deren Gegentaktspeicherung und Differenz- und Summenauswertung. Durch Differenzbildung der gemittelten Driftströme $\Delta \bar{i}_{ab}(t) = \bar{i}_a(t) - \bar{i}_b(t)$, die bei nichtstationären Lichtwellen zeitabhängig sind, werden dabei alle störenden Offset-Anteile unterdrückt und zugleich wird die gewünschte Korrelationsfunktion des Lichtsignals $P_{opt}(t-\tau)$ mit der Modulationsspannung
- 25 $U_m(t)$ gebildet.
- 30

Dieser Vorgang soll im einzelnen näher beschrieben werden. Das über $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ verursachte HF-Driftfeld bewirkt, daß die Elektronen zu der jeweilig positiven Seite driften. Während z.B. der positiven

27

- Halbwelle der Modulationsphotogatespannung $U_{am}(t)=U_0+U_m(t)$, d.h., während der negativen Halbwelle von $U_{bm}(t)=U_0-U_m(t)$, werden die photogenerierten Ladungsträger zum Akkumulationsgate G_a driften und dort als Ladungsmenge q_a angesammelt bzw weitergeleitet
- 5 (vergleiche die beiden oberen Modulationsphotogatespannungsverteilungen in Fig. 1b und c). In Fig. 3 ist für den Fall einer stationären, harmonisch modulierten Beleuchtung die optische Leistung pro Pixel dargestellt als

$$P_{opt}(t - \tau) = P_0 + P_m \cos(\omega t - \varphi_{opt}) \quad (3)$$

- 10 wobei P_0 den Mittelwert inklusive der Hintergrundbeleuchtung, P_m die Modulationsamplitude, ω_m die HF-Modulationsfrequenz, φ_{opt} die Phasenverzögerung und $\tau = \varphi_{opt} / \omega_m$ die entsprechende Laufzeitverzögerung der einfallenden Lichtwelle gegenüber der Modulationsphase an G_{am} repräsentiert. Der gesamte erzeugte Photostrom pro Pixel ist

$$15 \quad i(t) = S_\lambda \cdot P_{opt}(t - \tau) = S_\lambda \cdot [P_0 + P_m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_{opt})] \quad (4)$$

$$i(t) = I_0 + I_m \cdot \cos(\omega_m t - \varphi_{opt}) \quad (5)$$

- mit den Größen $i(t) = i_a(t) + i_b(t)$, I_0 = Mittelwert des Pixelphotostroms gemäß P_0 , I_m = Wechselamplitude des modulierten Photostroms gemäß P_m , und S_λ = Spektrale Empfindlichkeit. Dieser gesamte Photostrom pro Pixel ist in zwei Anteile aufgeteilt und zwar in den Strom $i_a(t)$ des Akkumulationsgates G_a und in den Strom $i_b(t)$ des Akkumulationsgates G_b . Da diese Werte aufintegriert werden - in CCD-Technologie unter den jeweiligen Akkumulationsgates G_a und G_b und bei der pixelweise auslesenden CMOS-Technologie vorzugsweise in der Ausleseelektronik - genügt es, im folgenden die Mittelwerte \bar{i}_a und \bar{i}_b dieser Ströme zu berücksichtigen. Das Maximum der Ladungsseparation wird für den Winkel $\varphi_{opt} = 0$ bzw. $\tau = 0$ erreicht. Dieser Fall ist in Fig. 3 dargestellt.
- 20
- 25
- 30 Bei harmonischer Modulation ergibt sich unter der Voraussetzung idealisierter Bedingungen wie geeigneter Modulationsamplitude, vernachlässigbarer Driftlaufzeiten, 100%-Modulationstiefe mit $P_m = P_0$ für die mittleren Photoströme \bar{i}_a bzw. \bar{i}_b

28

$$\dot{i}_a = \frac{I_0}{2} + \frac{I_m}{\pi} \cos(\varphi_{opt}) \quad (6)$$

$$\dot{i}_b = \frac{I_0}{2} - \frac{I_m}{\pi} \cos(\varphi_{opt}) \quad (7)$$

In Fig. 4 ist der Verlauf dieser idealisierten mittleren Pixelströme gezeigt. Sie repräsentieren die gegenphasigen Korrelationsfunktionen, die aus den HF-modulierten Empfangslicht und den an den Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} angelegten HF-Modulationsphotogatespannungen resultieren. Ihre Summe entspricht mit I_0 der mittleren Pixellichtleistung P_0 . Die gesamte Ladungsmenge, die über der Zeit $T = N \cdot T_m$ (d.h., über N Perioden T_m der HF-Modulationsspannung) angesammelt wird, ergibt sich zu

$$\dot{i}_a(\tau) \cdot T = q_{aT}(\tau) = \frac{I_0}{2} + \text{const.} \int_0^T P_{opt}(t - \tau) \cdot U_m(t) \cdot dt \quad (8)$$

mit einer der Phasenverzögerung entsprechenden Laufzeit $\tau = \varphi_{opt} / \omega_m$. Im folgenden wird q_{aT} nur noch mit q_a bezeichnet. Die Gesamtheit der Ladungen der Akkumulationsgates G_a bzw. G_b aller Pixel 1 formt zwei ortsdiskrete HF-Interferogramme, das a-Interferogramm bzw. das um 180° gegenüber dem a-Interferogramm verschobene b-Interferogramm, aus denen durch Differenzbildung das laufzeitbestimmte und gesuchte Differenz-HF-Interferogramm gebildet wird, das durch Gleichung (2) beschrieben wird.

In Fig. 11 ist das Schema einer erfindungsgemäßen 3D-Kamera gezeigt, das die direkte Mischung auf der Basis eines Arrays photonischer Mischelemente nutzt. Verglichen mit dem aus dem Stand der Technik bekannten 3D-Kamerakzept, daß in Fig. 10 dargestellt ist, wird in Fig. 11 die Modulation eines Senders 4 für eine Beleuchtung optisch passiver 3D-Objekte durch die Direktmodulation des Stroms einer Laserdiode realisiert. Dabei wird die Modulation durch einen HF-Generator 13 erzeugt. Für größere Abstände ist z.B. der Einsatz eines leistungsstarken Laserdiodenarrays mit vorzugsweise gemeinsamem Modulationsstrom und - zur Augensicherheit - mit unterschiedlichen Wellenlängen vorteilhaft.

Eine erste Optik 5 bildet die Lichtwelle auf die Oberfläche eines Objektes 6 ab. Die vom Objekt 6 reflektierte Lichtwelle wird dann durch eine zweite Optik 7 auf die Oberfläche eines photonischen Mischelementarrays 8 abgebildet.

- 5 Das photonische Mischelementarray 8 wird ebenfalls durch den HF-Generator 13 angesteuert, wobei die Ansteuerung für unterschiedliche Phasenverschiebungen zur Phase der abgestrahlten Lichtwelle durch den HF-Generator 13 erfolgt. Die Signale des photonischen Mischelementarrays 8 werden, soweit nicht bereits on-chip geschehen, schließlich von einer Auswerteeinheit 9 ausgewertet.

Aufgrund der erfindungsgemäßen Meßvorrichtung ist für das vorgeschlagene 3D-Kamerakonzzept neben dem erfindungsgemäßen photonischen Mischelementarray kein zusätzlicher optischer Modulator mit hoher Apertur notwendig, was zu einer wirtschaftlich vorteilhaften Lösung führt.

- Zur Bestimmung der Pixelphase φ_{opt} aus den resultierenden Korrelationsamplituden werden wie zuvor angegeben insgesamt vier verschiedene Interferogramme bei vier verschiedenen Phasen des Mischersignals herangezogen. Die vier Phasen des Mischersignals ergeben sich für den Fall, daß die Modulationsphotogatespannungen U_{am} und U_{bm} vom Zustand des Phasenverhältnisses $0^\circ/180^\circ$ auf den Zustand $90^\circ/270^\circ$ umgeschaltet bzw. um 90° verzögert werden. Auf diese Weise erhält man die beiden zugehörigen Imaginär- bzw. Quadratur-Komponenten zu den Real- bzw. Inphase-Komponenten, woraus die gesuchte Pixelphase gemäß der unten beschriebenen Gleichung (10) berechnet werden kann.

Diese Vorgehensweise ermöglicht gleichzeitig die Eliminierung von störenden Offset-Spannungen, die durch die Hintergrundhelligkeit und durch den Mischvorgang erzeugt werden.

- 30 Neben dem beispielhaft beschriebenen Meßvorgang von CW-modulierten 3D-Lichtwellen durch 2D-Korrelation mit einer Modulationsspannung $U_{\text{m}}(x,y,t)$ vorzugsweise gleicher Frequenz in der Ebene des photonischen Mischelementarrays kann die erfindungsgemäße Meß-

Vorrichtung auch mit pulsförmigen Modulationssignalen vorteilhaft eingesetzt werden.

Für Aufgaben der hochpräzisen Laufzeitmessung von 3D-Lichtwellen ist insbesondere eine Pseudo-Rausch-Modulation des Lichts vorteilhaft. Eine beispielhafte Ausführung zur Vermessung optisch passiver 3D-Objekte zeigt Fig. 12. Die erfindungsgemäße Vorrichtung weist ähnlich dem Ausführungsbeispiel mit harmonischer Modulation in Fig. 11 eine entsprechende Beleuchtungseinrichtung auf, die die 3D-Objekte 6 mit in der Intensität PN(Pseudo-Noise)-moduliertem Licht beleuchtet und das reflektierte und empfangene Licht dem Korrelationsprozeß mit vorzugsweise dem entsprechenden PN-Modulationssignal, das vom Generator 13 erzeugt wird, unterzieht.

Da die Korrelation derartiger PN-Signale mit zunehmender Wortlänge $T_W = T_B(2^N - 1)$ einem dreieckförmigen Nadelimpuls mit einer Halbwertsbreite gleich der Bitbreite T_B ähnelt, muß zur eindeutigen und vollständigen Vermessung des ganzen Lichtvolumens bzw. des ganzen beleuchteten Raumes eine relative Verzögerung T_D zwischen dem lichtmodulierenden PN-Signal und der demodulierenden PN-Gegentaktspannung $U_m(t)$ der gleichen Signalform an den Modulationsphotogates mindestens einmal den ganzen Verzögerungsbereich der maximalen Echolaufzeit kontinuierlich oder schrittweise in T_B -Schritten durchlaufen. Dazu dient das von der Steuerungs- und Auswerteeinheit 9 bezüglich der Verzögerung T_D einstellbare Verzögerungsglied 11.

In Fig. 5a ist am Beispiel einer rechteckförmigen 15Bit-PN-Sequenz das Modulationssignal $U_m(t)$ dargestellt. Das Ergebnis der Korrelation durch das photonischen Mischelement sind die in Fig. 5b über der relativen Verzögerung τ dargestellten gemittelten Driftströme \bar{i}_u und \bar{i}_b .

Beim später beschriebenen Vierfachpixel gemäß Fig. 8, Fig. 9 und Fig. 14 sind die an den Modulationsphotogates G_{cm} und G_{dm} anliegenden und der Vorspannung U_0 überlagerten Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen vorzugsweise um T_B gegenüber den an den Modulationsphotogates G_a und G_b anliegenden Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen verzögert, d.h. $U_{cm}(t) = U_0 + U_m(t - T_B)$ und $U_{dm}(t) = U_0 -$

$U_m(t-T_B)$, was zu sehr vorteilhaften Amplituden- und Laufzeitmessungen führt.

Bis auf eine vorgebbare Verzögerung T_D der Modulationsspannungen weist die vom Sender 4 abgestrahlte Lichtintensität $\text{const.} \cdot P_{\text{opt}}(t)$ die gleiche PN-Signalstruktur auf. Die Reflexion erreicht das photonische Mischelement nach der Echolaufzeit. Die Korrelation mit den Gegen-
 5 taktmodulationsspannungen führt je nach der relativen Laufzeitverzögerung τ für $T_D=0$ im Idealfall ohne Hintergrundhelligkeit beim Zweifachpixel auf die in Fig. 5b gezeigten mittleren Pixelströme \bar{i}_u und
 10 \bar{i}_v und beim Vierfachpixel mit dem genannten T_B -Zeitversatz zusätzlich auf die mittleren Pixelströme \bar{i}_c und \bar{i}_d . Diese Korrelationscharakteristik offenbart zunächst, daß mehrere Objektreflexionen auf dem gleichen Radiusvektor unterschieden werden können, z.B. zur Unterscheidung mehrerer hintereinander stehender teiltransparenter Ob-
 15 jekte oder zur Elimination von Mehrfachreflexionen.

Zusätzlich werden beim Zweifachpixel nacheinander und beim Vierfachpixel gleichzeitig vorzugsweise in der jeweils entsprechenden Pixelauslese- und Signalvorverarbeitungselektronik 15 die in Fig. 5c dargestellte Summe und Differenz der mittleren Driftstromdifferenzen
 20 gebildet. Sie erlauben hochempfindliche Messungen, da nur in dem T_B bis $2T_B$ breiten Meßfenster Signalwerte ungleich Null erscheinen. Durch die Auswertung der Summe wird die Relevanz einer Messung aufgrund einer Mindestamplitude bestimmt. Die Differenz zeigt einen steilen linearen Verlauf im nutzbaren T_B -breiten Meßfenster, der eine
 25 Laufzeitbestimmung mit hoher Auflösung erlaubt. Für das hier idealisierte Beispiel ist

$$\tau = T_D + \frac{T_B}{2} - \left[\frac{\Delta \bar{i}_{uh} - \Delta \bar{i}_{vd}}{\Delta \bar{i}_{uh} + \Delta \bar{i}_{vd}} \right] \cdot \frac{T_B}{2} \quad (9)$$

Das Blockschaltbild einer entsprechenden Meßvorrichtung zur optischen Vermessung von 3D-Objekten mit PN-Modulation auf der Basis
 30 des vorgeschlagenen Korrelations-Photodetektorarrays ist durch einen besonders einfachen Aufbau charakterisiert, wie in Fig. 12 veranschaulicht ist. Außer dem Generator 10 und dem Verzögerungsglied 11 ist dabei der gleiche Aufbau wie in Fig. 11 gegeben.

Zur schnellen Entfernungsbestimmung bei geringerer Auflösung wird erfindungsgemäß auch eine einfache Rechteckmodulation des Senders 4 durch den Generator 10 mit der Periode T und vorzugsweise gleicher Puls- und Pausendauer T_B verwendet. Die Laufzeitermittlung erfolgt nach Gleichung (9). Die Auflösung wird schrittweise durch die mit dem Faktor 2 abnehmende Periodendauer T erhöht, wobei auf den ersten Meßschritt zunächst ein zweiter mit gleicher Periode aber einer Zeitverschiebung $T_D = T/4$ erfolgt.

Der in Fig. 1 beispielhaft dargestellte Querschnitt des Pixels 1 des erfindungsgemäßen photonischen Mischelementes kann bezüglich seiner Grenzfrequenz durch eine geeignete Auslegung des durch die Gegentakmodulationsspannung verursachten Potentialgefälles optimiert werden. Hierzu zeigt Fig. 6 ein Ausführungsbeispiel, bei dem ein mittleres Gate G_0 zwischen den Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} angeordnet ist, das vorzugsweise auf der Vorspannung U_0 liegt, und das zusammen mit den Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} drei Potentialstufen bildet. Erwünscht ist ein möglichst gleichmäßiges Potentialgefälle bzw. ein möglichst konstantes Modulationsdriftfeld, was durch Erhöhung der Stufenzahl von zwei auf drei oder auch mehr erreicht wird. In der photosensitiven Raumladungszone nimmt mit dem Abstand von der Isolierschicht 3 ohnehin die Ausprägung der Stufen ab. Dieser Effekt wird in einer weiteren erfindungsgemäßen Ausführung genutzt, und zwar durch Verwendung eines sogenannten "Buried Channel", eines von der Isolierschicht einige μm entfernten, etwas tiefer im p-Substrat unter den Modulationsphotogates liegenden, schwach dotierten n-Kanals. Weiterhin ist eine Abschattung 12 für die Akkumulationsgates G_a und G_b vorgesehen, damit diese nicht von der Lichtwelle beleuchtet werden und zusätzliche Ladungsträger erzeugt werden.

Fig. 7 zeigt eine besondere Ausführung und Verbindung photonischer Mischelemente, bei der gegenüber der in Fig. 1 die beiden Modulationsphotogates jeweils nur durch ein gemeinsames Akkumulationsgate $G_{s,n}$ getrennt sind, wodurch ein höherer Füllwirkungsgrad erreicht wird. Auch hier ist eine Abschattung 12 der Akkumulationsgates G_a und G_b vorgesehen. Dabei wechselt die Polarität der Gegentak-

modulationsspannungen bzw. die Reihenfolge von $G_{am,n}$ und $G_{bm,n}$ von Pixel zu Pixel. Diese Dreierperiode der Gates eignet sich zugleich zum direkten Auslesen durch einen Betrieb als Drei-Phasen-Schieberegister. Ein in bestimmten Anwendungen tolerierbarer Nachteil liegt
5 in der Ladungsverteilung auch auf die jeweils benachbarten Pixel, die zu einer scheinbaren Pixelvergrößerung und geringerer Ortsauflösung in der betreffenden Richtung führt.

Eine Berechnung dieser Zusammenhänge ergibt, daß gegenüber einer 100%-Nutzladung bei der Auswertung der Ladungsdifferenzen das
10 zentrale, betrachtete Pixel nur 50% erhält und die beiden Nachbapixel jeweils 25 % erhalten.

Zur Veranschaulichung der Ladungsverteilung sind in Fig. 7 analog zu Fig. 1 die verschiedenen Phasen der Potentialverteilung für CW-Modulation dargestellt.

- 15 In Fig. 8 ist eine weitere vorteilhafte Ausführung des Designs eines Pixels eines photonischen Mischelementes dargestellt, das bei CW-Modulation keine IQ (Inphase, Quadraturphase)-Umschaltung zwischen den I- und Q-Zuständen benötigt. Anstelle des zuvor beschriebenen Zweifachpixels wird ein Vierfachpixel mit den Modulationsphotogates
20 G_{am} , G_{bm} , G_{cm} und G_{dm} sowie den zugehörigen Akkumulationsgates G_a , G_b , G_c und G_d vorgeschlagen, das die Korrelation gleichzeitig für vier Phasenlagen ermöglicht, da die Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ bzw. $U_{cm}(t)$ und $U_{dm}(t)$, insbesondere bei HF-Modulation um 90° , gegeneinander verschoben sind.
- 25 In orthogonaler Anordnung zu den beschriebenen Modulationsphotogates G_{am} mit $\varphi_{am} = 0^\circ$ und G_{bm} mit $\varphi_{bm} = 180^\circ$ befinden sich daher zwei weitere innerhalb des Pixels symmetrisch integrierte Modulationsphotogates G_{cm} mit $\varphi_{cm} = 90^\circ$ und G_{dm} mit $\varphi_{dm} = 270^\circ$, die nach dem gleichen Prinzip arbeiten. Auf diese Weise entsteht eine Vierphasen-
30 Ladungsakkumulation mit den Einzelladungen q_a , q_b , q_c und q_d unter den zugehörigen Akkumulationsgates G_a , G_b , G_c und G_d oder in der zugehörigen Ausleseelektronik, wobei mittels einer einfachen arithmetischen Operation die zugehörige Phase φ_{opt} folgendermaßen direkt berechnet wird:

$$\varphi_{opt} = \arctan \frac{q_c - q_d}{q_a - q_b} \quad (10)$$

Für die einfache Grauwertbestimmung eines einzelnen Pixels werden die Einzelladungen aller Akkumulationsgates eines Pixels aufsummiert: $q_{\text{Pixel}} = q_a + q_b + q_c + q_d$. Der Ausleseprozeß der jeweils vier Ladungen wird in diesem Fall zweckmäßig durch ein aktives Pixel-Design in CMOS-Technik mit pixelweise integrierter Signalvorverarbeitung durchgeführt.

Fig. 9 zeigt ebenso wie Fig. 8 ein Vierfachpixel eines photonischen Mischelementes, allerdings mit einem entsprechend Fig. 6 geglättetem Potentialgefälle mit Hilfe des zentralen, vorzugsweise auf dem Potential U_0 liegenden quadratischen mittleren Gate G_0 .

Fig. 14 zeigt ebenso wie Fig. 9 ein Vierfachpixel eines photonischen Mischelementes mit einer für digitale Modulationssignale optimierten Struktur. Das zwischen den vorzugsweise quadratischen Modulationsphotogates angeordnete mittlere Gate G_0 dient ähnlich wie in Fig. 9 der Glättung des durch die Modulationsphotogatespannung erzeugten Potentialgefälles.

Fig. 13 zeigt schließlich eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines Pixels 1, das im Gegensatz zu den zuvor aufgezeigten Ausführungsbeispielen nicht in CCD-Technologie, sondern in CMOS-Technologie mit pixelweiser Auslese- und Signalvorverarbeitungselektronik realisiert ist. Die Funktionsweise des modulationsspannungsabhängigen Driftens der Ladungsträger auf der Ladungsschaukel ist dabei dieselbe wie bei den zuvor aufgezeigten Ausführungsbeispielen. Unterschiedlich ist bei dem in Fig. 13 dargestellten Ausführungsbeispiel lediglich die Art der Weiterverarbeitung der zu den Akkumulationsgates G_a und G_b gedrifteten Ladungen q_a und q_b .

Die Akkumulationsgates G_a und G_b sind im vorliegenden Ausführungsbeispiel als gesperrte pn-Dioden ausgebildet. Auf einem vorzugsweise schwach dotierten p-Si-Substrat 3 in Fig. 13 werden die positiv vorgespannten Akkumulationsgates G_a und G_b durch n_+ -dotierte Elektroden gebildet. Im sog. "Floating-Diffusion"-Betrieb bzw. im

hochohmigen Spannungsauslesemodus werden wie bei der CCD-Technologie die Ladungen q_a und q_b auf den Kapazitäten der Akkumulationsgates G_a und G_b integriert und als Spannungswerte hochohmig ausgelesen.

- 5 In vorteilhafter Weise kann auch ein Stromauslesemodus eingesetzt werden, bei dem die photogenerierten Ladungsträger nicht im Potentialtopf integriert, sondern fortlaufend über eine Ausgangsdiffusion über an die Akkumulationsgates G_a bzw. G_b angeschlossene, geeignete Stromausleseschaltungen weitergeleitet werden. Anschließend werden
10 diese Ladungen bspw. jeweils auf einer externen Kapazität integriert.

- Durch eine Ausleseschaltung im Stromauslesemodus, der durch Verstärkerrückkopplung die Akkumulationsgatespannung virtuell konstant hält, wird in vorteilhafter Weise vermieden, daß bei einer intensiven Bestrahlung des Pixels die Menge der angesammelten Ladungen
15 q_a und q_b zu einer Rückwirkung oder gar zu einem Überlaufen des Potentialtopfes führt. Die Dynamik des photonischen Mischelementes wird dadurch erheblich verbessert. Auch hierbei wird durch die genannte Technik eines Schwach dotieren n-Kanals ("Buried Layer") unter der Isolierschicht der Modulationsgates Verbesserungen, u.a. eine
20 Steigerung der Grenzfrequenz erzielt.

- Die Ausgestaltung des photonischen Mischelementes in CMOS-Technologie ermöglicht weiterhin die Anwendung eines Aktiv-Pixel-Designs (APS), mit dem zu jedem Pixel eine Auslese- und Signalvorverarbeitungsschaltung in das photonische Mischelement integriert werden
25 kann. Somit ist eine Vorverarbeitung der elektrischen Signale direkt am Pixel möglich, bevor die Signale an eine externe Schaltung weitergeleitet werden. Insbesondere kann somit die Phasen- und Amplitudeninformation direkt auf dem Chip berechnet werden, so daß sich die Meßrate weiter erhöhen läßt.

- 30 In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird ein vorzugsweise zweidimensionales photonisches Mischelementarray für eine dreidimensionale elektronische Objektsuche und -verfolgung passiv oder aktiv leuchtender Objekte nach verschiedenen Kriterien, wie z.B. Objektform, -position, -farbe, -polarisation, -geschwindigkeitsvektor,

-helligkeit oder einer Kombination von Objekteigenschaften verwendet. Wird z.B. beim Durchlaufen verschiedener Modulationssignale (z.B. Frequenz- oder Codeänderung) bei der 3D-Vermessung einer einfallenden Lichtwelle, die zunächst unbekannt sein kann, eine
 5 örtliche Korrelation durch das Kriterium von Differenzdriftströmen ungleich Null gefunden, so kann danach fortlaufend dieser Objektbereich gezielt bezüglich der genannten Objekteigenschaften vermessen und ggfs. bei Veränderungen über eine Regelschleife, die insbesondere die Bildtiefe mit einschließt, verfolgt werden.

- 10 Das photonische Mischelement wird in verschiedenen Betriebsweisen eingesetzt, die im folgenden dargestellt werden.

Die Summenladung an den Akkumulationsgates G_a und G_b interessiert hierbei weniger, da sie immer der Gesamtintensität der einfallenden Lichtwellen entspricht, $q_a + q_b = \text{const.} \cdot P_{\text{opt,ges}} \cdot T$ mit T = Integrationszeit.
 15

Die Differenzladung $\Delta q_{ab} = q_a - q_b = \bar{i}_a \cdot T - \bar{i}_b \cdot T$ hängt von mehreren Faktoren ab und kann in mehrfacher Weise zur Vermessung der einfallenden Lichtwelle genutzt werden. Dazu wird eine immer vorhandene Grundhelligkeit $P_0 \geq P_m$ (s. Fig. 3a) berücksichtigt.

- 20 Wahlweise wird z.B. bei einer Vermessung eines durch einen Sender 4 mit moduliertem Licht beleuchteten Objekts 6 die Sendeleistung ein- oder ausgeschaltet und damit wird P_m endlich oder gleich Null. Gleichzeitig wird wahlweise die Modulationsspannung $U_m(t)$ entweder zu Null oder auf den im Sender verwendeten oder im einfallenden Licht enthaltenen Verlauf oder auf eine während der Integrationszeit konstante Spannung U_{m0} geschaltet.
 25

Damit ergeben sich mit $P_0 \neq 0$ vier wichtige Betriebsweisen:

- 1.) $\Delta q_{ab} = 0$ für $P_m = 0$ und $U_m = 0$.
- 2.) $\Delta q_{ab} = 0$ bei endlichem P_m und mit $U_m(t)$ als HF-Modulationssignal.
- 30 3.) Mit endlichem P_m und einer hochfrequenten Modulationsspannung ist Δq_{ab} eine Funktion von $U_m(t)$, von der relativen Modulation

37

onslaufzeitverschiebung τ und von dem einfallenden, derart modulierten Lichtleistungsanteil $P_m(t)$.

- 4.) Besteht während einer Integrationszeit T eine einfallende mittlere Lichtintensität P_0 und eine konstante Modulationsspannung U_{m0} , so ist die Differenzladung Δq_{ab} eine Funktion von U_{m0} und der mittleren Lichtleistung P_0 .

Bei Lichtwellen, die nicht intensitätsmoduliert sind, wird in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung das photonische Mischelement entsprechend dem vierten Fall einer möglichen Betriebsweise z.B. für die 2D-Bildverarbeitung eingesetzt.

- Dabei ist jedes Mischelement gezielt und unabhängig voneinander ansteuerbar, z.B. durch pixelweise Zuordnung je eines schnell überschreibbaren Modulationsspannungswortes für U_{m0} vorzugsweise mittels eines RAM-Bausteins. Ausgewertet werden vorzugsweise nur die näherungsweise zu U_{m0} proportionalen Differenzdriftströme $\Delta \bar{i}_{ub}$ bzw. Differenzladungen $T \cdot \Delta \bar{i}_{ub}$. Die Modulationsspannung U_{m0} wird dabei jeweils von dem Modulationsspannungswort abgeleitet.

- Damit wird $U_m(t)$ nicht mehr periodisch oder quasi-periodisch wie in den vorangehenden Anwendungsbeispielen, sondern aperiodisch z.B. gemäß einem vorgegebenen oder gemäß dem gemessenen Bildinhalt eingestellt. Für $U_m(t)=0$ ergeben sich alle Differenzströme zu Null, so daß das zugehörige Differenzbild $D(x,y)$ ebenfalls mit der Amplitude bzw. Intensität Null erscheint.

- Die Differenzbildhelligkeit kann somit gezielt durch Variation von $U_m(x,y,t)$ beeinflußt werden. Damit können erfindungsgemäß beliebige, also auch unmodulierte Lichtwellen bzw. Bilder über eine extrem schnell einstellbare Gewichtsfunktion $G(x,y,t)=k_1 \cdot U_m(x,y,t)$ z.B. über die genannten steuerbaren, pixelweise zugeordneten Speicherzellen einer vielseitigen Bildverarbeitung erschlossen werden, wie z.B. die zuvor aufgeführten Anwendungen zur Objektsuche und -verfolgung, allerdings hierbei ohne den Aspekt der Tiefeninformation.

1. Verfahren zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle

- bei dem eine elektromagnetische Welle auf die Oberfläche eines mindestens ein Pixel aufweisenden photonischen Mischelementes eingestrahlt wird, wobei das Pixel mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} und zugeordnete Akkumulationsgates G_a und G_b aufweist,

- bei dem an die Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ angelegt werden, die als $U_{am}(t)=U_o+U_m(t)$ und $U_{bm}(t)=U_o-U_m(t)$ ausgestaltet sind,

- bei dem an die Akkumulationsgates G_a und G_b eine Gleichspannung angelegt wird, deren Betrag mindestens so groß wie der Betrag der Summe aus U_o und der Amplitude der Modulationsspannung $U_m(t)$ ist,

- bei dem die in der Raumladungszone der Modulationsphotogates G_{am} und G_{bm} von der einfallenden elektromagnetischen Welle erzeugten Ladungsträger in Abhängigkeit von der Polarität der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und zum entsprechenden Akkumulationsgate G_a oder G_b driften und

- bei dem die jeweils zu den Akkumulationsgates G_a und G_b gedrifteten Ladungen q_a und q_b abgeleitet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

- bei dem von einem Sender eine intensitätsmodulierte elektromagnetische Welle abgestrahlt wird,

- bei dem die von einem Objekt reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes eingestrahlt wird,

- bei dem die Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ mit der Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle in fester Phasenbeziehung stehen und

- bei dem die erzeugten Ladungsträger zusätzlich in Abhängigkeit von der Phase der Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2,

- bei dem für zwei verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta_{\varphi 1}$ und $\Delta_{\varphi 2}$ der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle die Ladungen q_{a1} und q_{b1} sowie q_{a2} und q_{b2} abgeleitet und die Ladungsdifferenzen $(q_{a1} - q_{b1})$ und $(q_{a2} - q_{b2})$ gebildet werden und

- bei dem nach der Gleichung

$$\varphi_{opt} = \frac{q_{a2} - q_{b2}}{q_{a1} - q_{b1}}$$

die Pixelphase φ_{opt} der einfallenden elektromagnetischen Welle relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle

40

und somit die Laufzeit der vom Pixel empfangenen elektromagnetischen Welle bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3,

- bei dem mit Hilfe von vier Modulationsphotogates G_{am} , G_{bm} , G_{cm} und G_{dm} und von vier zugeordneten Akkumulationsgates G_a , G_b , G_c und G_d , für zwei verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta\varphi_1$ und φ_2 der Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t) = U_o + U_{m1}(t)$ und $U_{bm}(t) = U_o - U_{m1}(t)$ sowie $U_{cm}(t) = U_1 + U_{m2}(t)$ und $U_{dm}(t) = U_1 - U_{m2}(t)$ relativ zur Phase der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle gleichzeitig die Ladungen q_a , q_b , q_c und q_d getrennt und abgeleitet werden und

- bei dem nach der Gleichung

$$\varphi_{opt} = \frac{q_c - q_d}{q_a - q_b}$$

die Pixelphase φ_{opt} der vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Welle und somit die Laufzeit der vom Pixel empfangenen elektromagnetischen Welle bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,

- bei dem das photonische Mischelement eine Mehrzahl von Pixeln aufweist,

- bei dem mindestens ein Pixel mit einem Teil der intensitätsmodulierten elektromagnetischen Welle vom Sender direkt bestrahlt wird und

41

- bei dem aus der mit diesem Pixel gemessenen Phasenverschiebung eine Kalibrierung der Phasenverschiebung zwischen der abgestrahlten elektromagnetischen Welle und den Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ durchgeführt wird.

5

6. Verfahren nach Anspruch 1,

- bei dem eine elektromagnetische Welle mit fremderregter unbekannter Intensitätsmodulation auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes eingestrahlt wird,

10

- bei dem die Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ von einem durchstimmbaren Modulationsgenerator erzeugt werden,

15

- bei dem die erzeugten Ladungsträger zusätzlich in Abhängigkeit von der Phase der Gegentakt-Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ und $U_{bm}(t)$ dem Potentialgefälle eines Driftfeldes ausgesetzt werden und

20

- bei dem das photonische Mischelement und der Modulationsgenerator mindestens einen Phasenregelkreis bilden und die elektromagnetische Welle nach der Lock-in-Methode vermessen wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem als periodische Modulation eine kontinuierliche oder diskontinuierliche HF-Modulation, eine Pseudo-Rausch-Modulation oder eine Chirp-Modulation verwendet wird.

25

8. Verfahren nach Anspruch 7, bei dem die Modulation eine HF-Modulation ist und vorzugsweise die Ladungen q_a und q_b und ggfs. q_c und q_d für die Phasenverschiebungen $\Delta\varphi = 0^\circ/180^\circ$ und $90^\circ/270^\circ$ abgeleitet

30

werden.

- 5 9. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem eine stationäre Modulation mit Modulationsphotogatespannungen $U_{am} = U_0 + U_{m0}$ und $U_{bm} = U_0 - U_{m0}$ mit einer zeitweise konstanten, einstellbaren Modulationsgleichspannung U_{m0} , mit der das Differenzbild aus der Differenz der Ladungen q_a und q_b gezielt gewichtet wird, verwendet wird.
- 10 10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die Ladungen q_a und q_b unterhalb der Akkumulationsgates G_a und G_b integriert werden und mit einer Multiplexstruktur, vorzugsweise mit einer CCD-Struktur, ausgelesen werden.
- 15 11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, bei dem die Akkumulationsgates G_a und G_b als pn-Dioden, vorzugsweise als gesperrte kapazitätsarme pn-Dioden und vorzugsweise in CMOS-Technologie, ausgebildet sind und bei dem die Ladungen q_a und q_b und gegebenenfalls q_c und q_d direkt als Spannung oder als Strom ausgelesen werden.
- 20 12. Verfahren nach Anspruch 11, bei welchem die Pixelphase bzw. die Pixellaufzeit und die Pixelhelligkeit direkt mit Hilfe einer Aktiv-Pixel-Sensor-Struktur (APS) ermittelt und vorzugsweise über eine On-Chip-Multiplexstruktur wahlfrei und/oder seriell ausgelesen werden.
- 25 13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, bei welchem die Pixelhelligkeit jeweils als Summe der Ladungen der zugehörigen Akkumulationsgates als Grauwertbild ausgewertet wird.
- 30 14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß im Falle einer Hintergrundbeleuchtung bzw. einer

externen, nicht modulierten Zusatzbeleuchtung die Differenz der Grauwertbilder einerseits bei eingeschalteter und andererseits bei ausgeschalteter modulierter Beleuchtung als Korrekturgröße verwendet wird.

5

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere separate Mischelemente in einer linearen, flächigen oder räumlichen Feldanordnung verwendet werden.

'0

16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eines der Pixel direkt mit einem Teil der als Beleuchtung dienenden, intensitätsmodulierten elektromagnetischen Welle bestrahlt wird und daß die Messung an diesem mindestens einen Pixel zum Kalibrieren der übrigen Phasen und Helligkeitsergebnisse verwendet wird, wobei vorzugsweise das bzw. die Referenzpixel vom Sender mit unterschiedlichen bzw. unterschiedlich einstellbaren Intensitäten beaufschlagt werden.

15

17. Photonisches Mischelement

20

- mit mindestens einem Pixel (1),

- das mindestens zwei lichtempfindliche Modulationsphotogates (G_{am} , G_{bm}) und

25

- den Modulationsphotogates (G_{am} , G_{bm}) zugeordnete, gegenüber der einfallenden elektromagnetischen Welle abgeschattete Akkumulationsgates (G_a , G_b) aufweist.

30

18. Mischelement nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Modulationsphotogates (G_{am} , G_{bm}) ein mittleres Gate (G_0) angeordnet ist.
- 5 19. Mischelement nach Anspruch 17 oder 18, dadurch gekennzeichnet, daß das Pixel (1) vier, vorzugsweise symmetrisch angeordnete, Modulationsphotogates (G_{am} , G_{bm} , G_{cm} , G_{dm}) und Akkumulationsgates (G_a , G_b , G_c , G_d) aufweist.
- 10 20. Mischelement nach einem der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Akkumulationsgates (G_a , G_b und gegebenenfalls G_0 , G_d) als pn-Dioden, vorzugsweise als gesperrte, kapazitätsarme pn-Dioden und vorzugsweise in CMOS-Technik ausgeführt, ausgebildet sind und die Ladungen q_a , q_b und gegebenenfalls q_c , q_d direkt als Spannung oder als Strom auslesbar sind.
- 15 21. Mischelement nach einem der Ansprüche 17 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß zwecks Erhöhung der maximalen Modulationsgeschwindigkeit das Pixel in GaAs-Technik, vorzugsweise in "Buried Channel"-Technik (zum Beispiel vergrabener n-Kanal) und mit integriertem Driftfeld ausgebildet ist.
- 20 22. Mischelement nach einem der Ansprüche 17 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß das Pixel (1) als Aktiv-Pixel-Sensor-Struktur mit teilweise pixelbezogener Signalverarbeitung und teilweise Zeilen- oder gegebenenfalls matrixbezogener Signalverarbeitung ausgebildet ist.
- 25 23. Mischelement nach einem der Ansprüche 17 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß die Abschattung auch auf die Randbereiche der Modulationsphotogates ausgedehnt ist.
- 30

24. Mischelementanordnung mit mindestens zwei photonischen Mischelementen nach einem der Vorrichtungsansprüche 17 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die photonischen Mischelemente in einer eindimensionalen, zweidimensionalen oder dreidimensionalen Anordnung angeordnet sind.

25. Mischelementanordnung nach Anspruch 24, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils zwei benachbart angeordneten, unterschiedlichen Pixeln (n , $n+1$) zugeordnete Modulationsphotogates ($G_{am,n}$, $G_{am,n+1}$) bzw. ($G_{bm,n}$, $G_{bm,n+1}$) jeweils ein gemeinsames Akkumulationsgate (G_s) aufweisen und daß die Modulationsphotogates ($G_{am,n}$, $G_{am,n+1}$) bzw. ($G_{bm,n}$, $G_{bm,n+1}$) jeweils von der gleichen Modulationsphotogatespannungen $U_{am}(t)$ bzw. $U_{bm}(t)$ beaufschlagt sind.

26. Mischelementanordnung nach Anspruch 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß Einrichtungen für die direkte Bestrahlung mindestens eines Pixels (1) als Referenzpixel vorgesehen sind, durch welche ein Teil der von dem Sender ausgehenden intensitätsmodulierten elektromagnetischen Strahlung auf das bzw. die betreffende(n) Pixel gerichtet wird.

27. Mischelementanordnung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen für die direkte Bestrahlung für eine räumliche und/oder zeitliche Änderung der Intensität der direkten Bestrahlung ausgerüstet sind.

28. Ein- oder mehrdimensionale Mischelementanordnung nach einem der Ansprüche 24 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Pixel (1) in MOS-Technik auf einem Siliciumsubstrat (2) ausgeführt und mit einer Multiplexstruktur, vorzugsweise mit einer CCD-Struktur, auslesbar

sind.

29. Mischelementanordnung nach einem der Ansprüche 24 bis 28, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mikrolinsenoptik vorgesehen ist, welche im wesentlichen für jedes für die Bildaufnahme verwendete Mischelement eine eigene Mikrolinse bereitstellt, durch welche die einfallende Strahlung auf einen zentralen Bereich des somit verkleinerbaren Mischelementes fokussiert wird.

30. Vorrichtung zur Bestimmung der Phaseninformation einer elektromagnetischen Welle

- mit mindestens einem photonischen Mischelement nach einem der Vorrichtungsansprüche 17 bis 23,

- mit einem Modulationsgenerator (10, 13),

- mit einem Sender (4), dessen abgestrahlte elektromagnetische Welle vom Modulationsgenerator (10, 13) in vorgegebener Weise intensitätsmoduliert ist,

- wobei die von einem Objekt (6) reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des photonischen Mischelementes einstrahlt und

- wobei der Modulationsgenerator (10, 13) das photonische Mischelement mit Modulationsspannungen $U_m(t)$ versorgt, die in vorgegebener Phasenbeziehung zur Phase der abgestrahlten elektromagnetischen Welle des Senders stehen.

31. Vorrichtung nach dem vorangegangenen Vorrichtungsanspruch, dadurch gekennzeichnet, daß eine Optik (7) und eine Mischelementanordnung gegebenenfalls nach einem der Ansprüche 24 bis 29 vorgesehen sind, wobei die Optik (7) die reflektierte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des Mischelementes bzw. der Mischelementanordnung abbildet.
32. Vorrichtung nach Anspruch 30 oder 31, dadurch gekennzeichnet, daß eine Mischelementanordnung mit zugehöriger Empfangsoptik, Auswerteelektronik und Signalverarbeitung für die Differenzsignale, Summensignale und zugehörigen Referenzsignale, mit einem digitalen Speicher für das Grauwertbild und das Laufzeit- bzw. Entfernungsbild, einem eine dreidimensionale Szene mit modulierten, elektromagnetischen Wellen beleuchtenden Sender, mit einer der Empfangsoptik entsprechenden, einstellbaren Sendeoptik unter Bildung einer digitalen 3D-Photokamera in Form einer kompakten Einheit vorgesehen sind.
33. Vorrichtung nach Anspruch 30 oder 31, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bildung einer digitalen, dreidimensional aufnehmenden Videokamera eine Mischelementanordnung mit zugehöriger Empfangsoptik, Auswerteelektronik und Signalverarbeitung für die Differenzsignale, die Summensignale und die zugehörigen Referenzsignale, ein digitaler Speicher für das Grauwertbild und das Laufzeit- bzw. Entfernungsbild, einem eine dreidimensionale Szene mit modulierten, elektromagnetischen Wellen beleuchtenden Sender und mit einer der Empfangsoptik entsprechenden, einstellbaren Sendeoptik vorgesehen sind, wobei weiterhin Speichereinrichtungen für die Speicherung von digitalen Bildfolgen vorgesehen sind.

48

34. Vorrichtung nach Anspruch 32 oder 33, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung von Farbbildern bzw. Farbauszügen der Sender Einrichtungen zur Aussendung von Lichtwellen in verschiedenen Spektralbereichen vorgesehen ist.

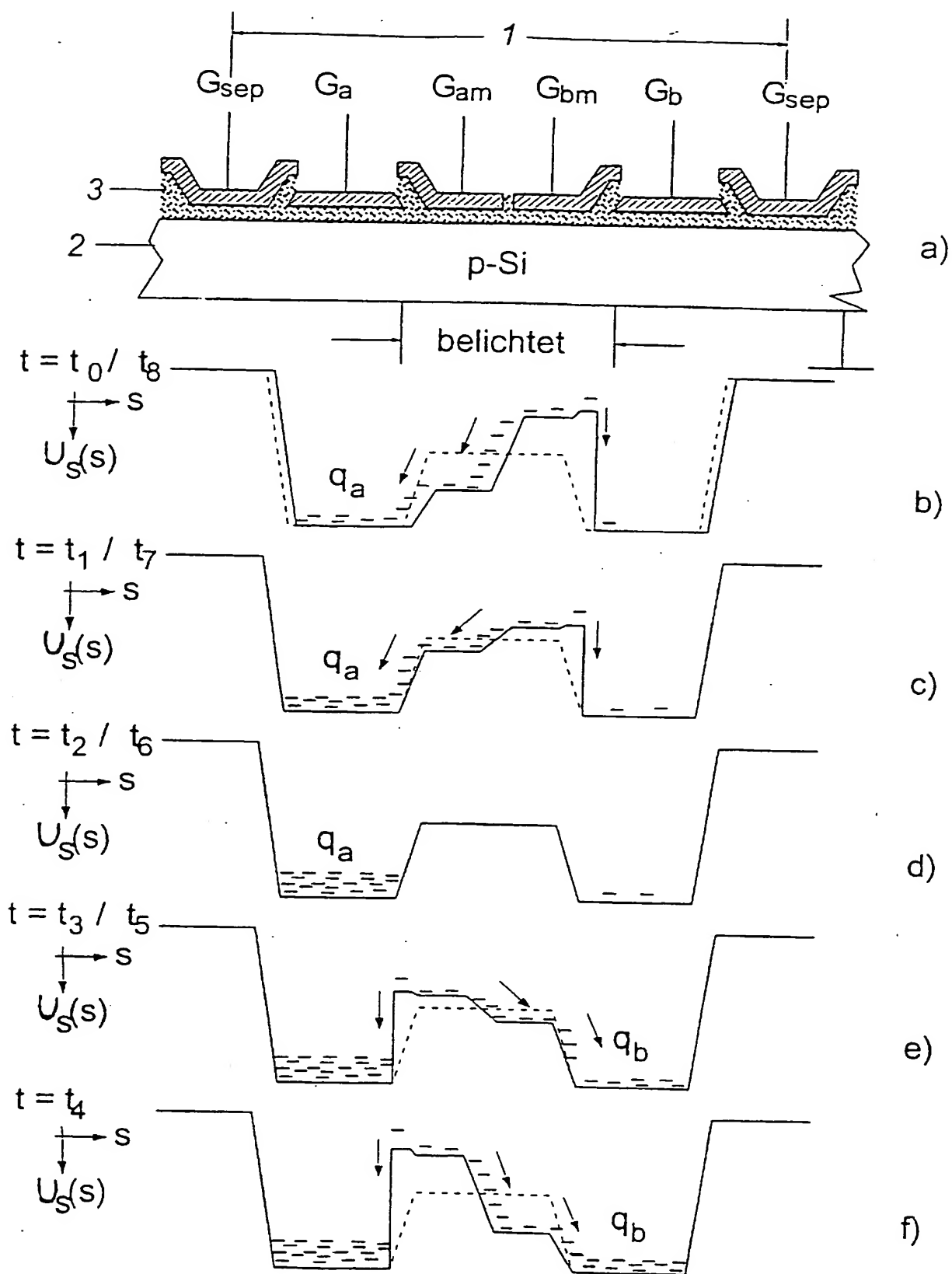


Fig. 1

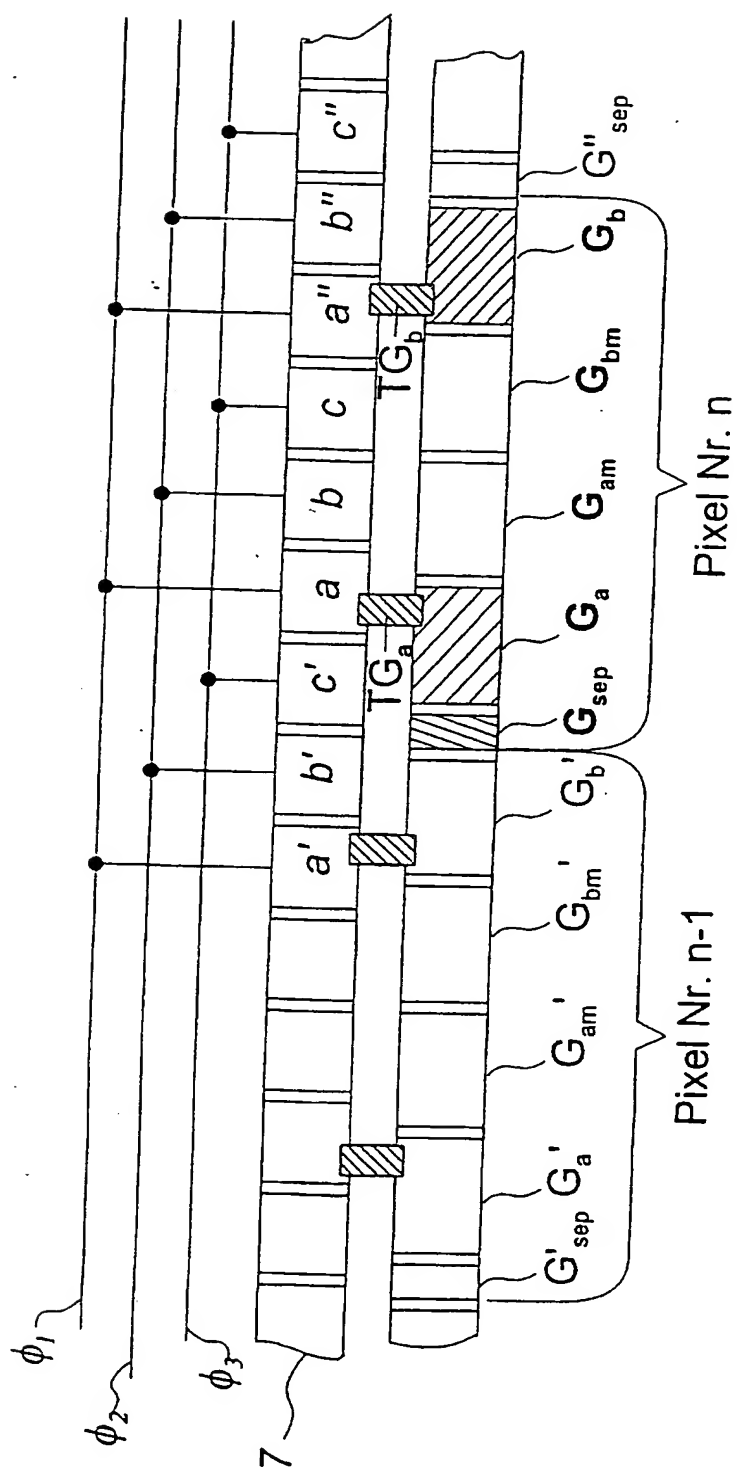


Fig. 2

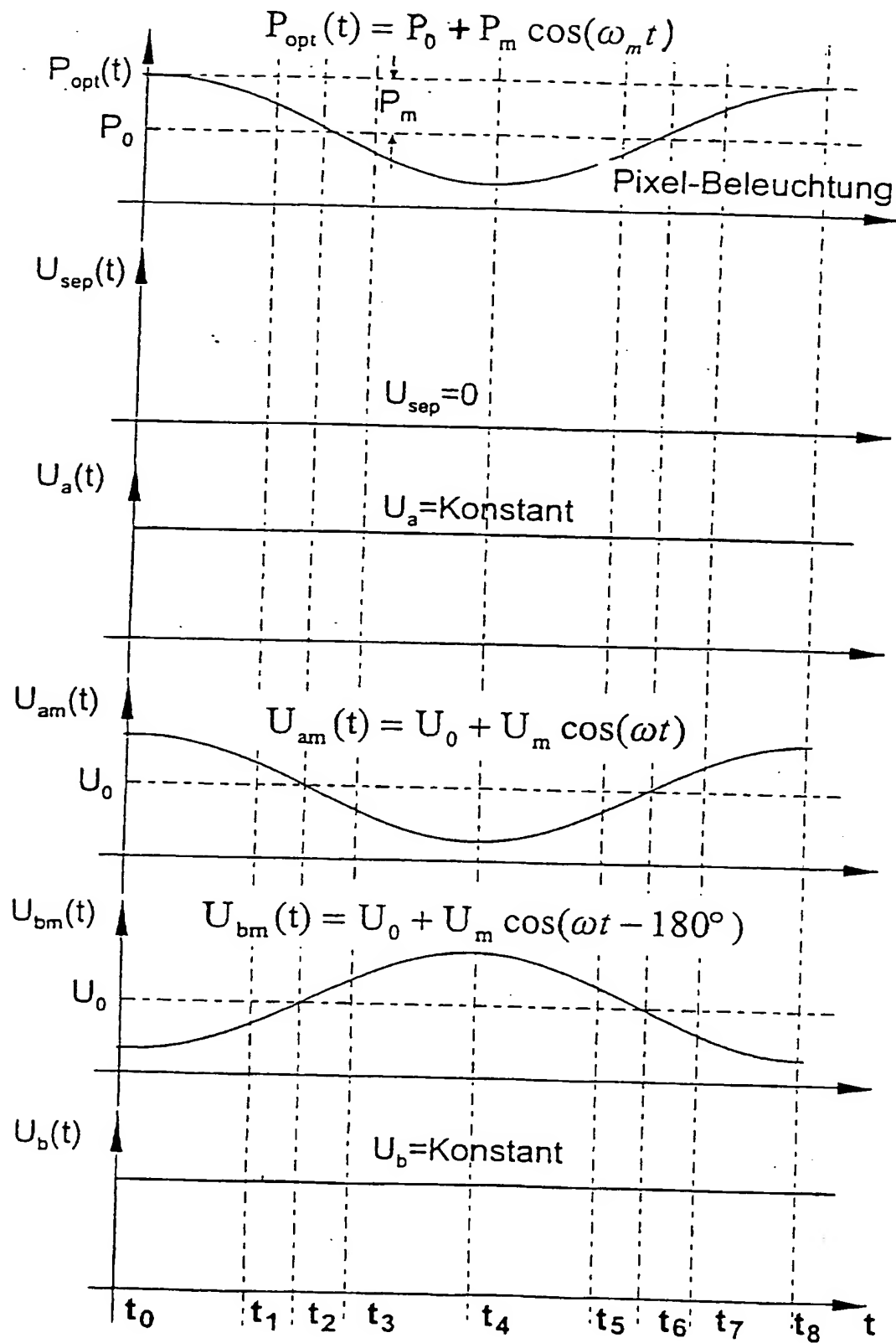


Fig. 3

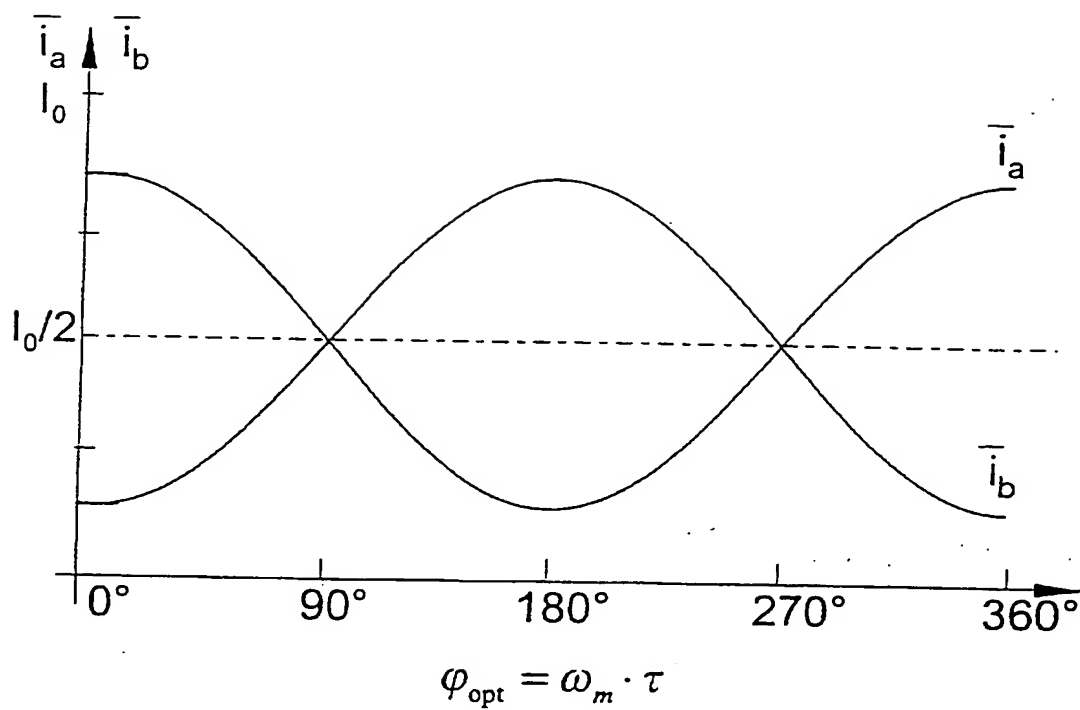
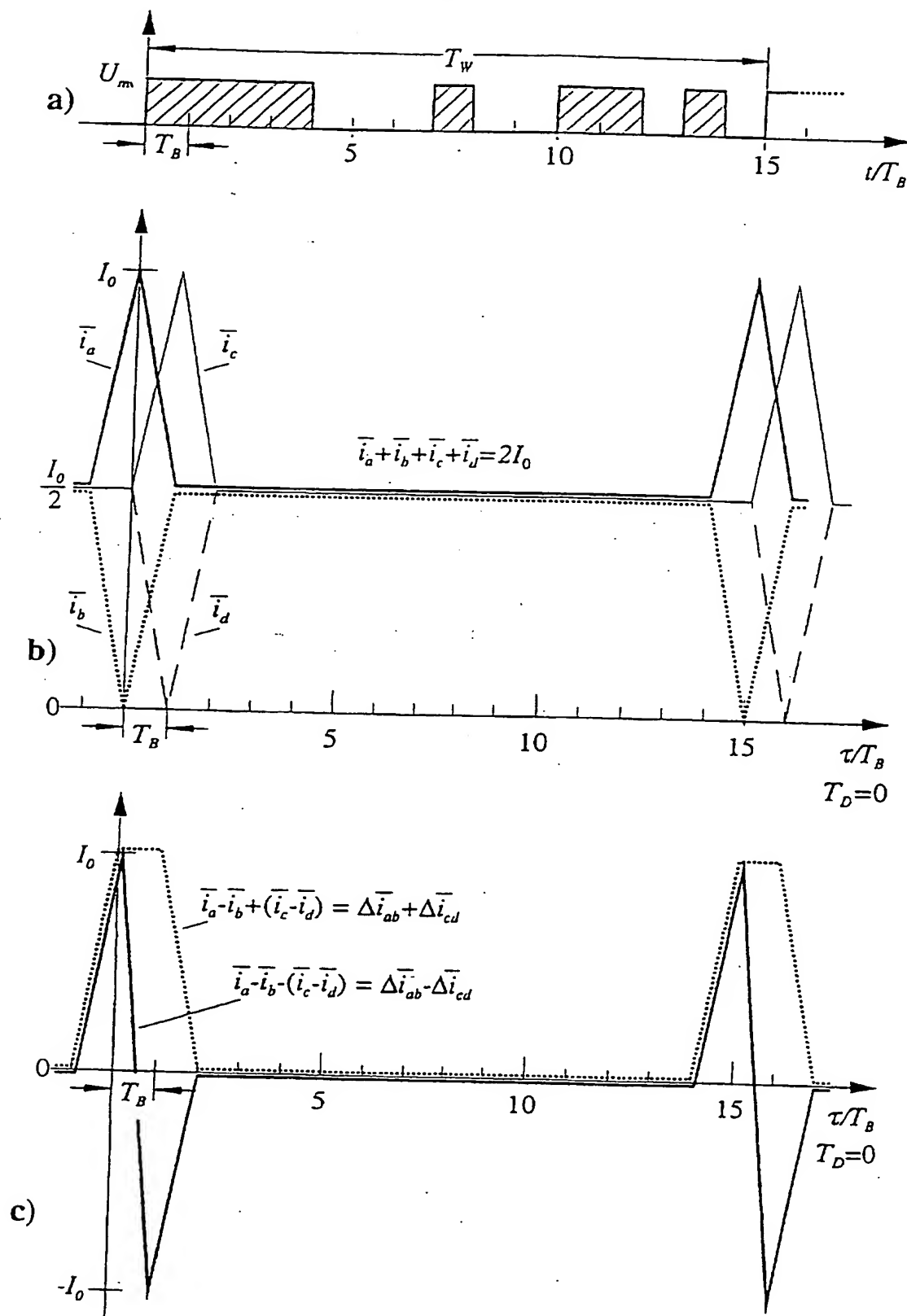


Fig. 4

5/14



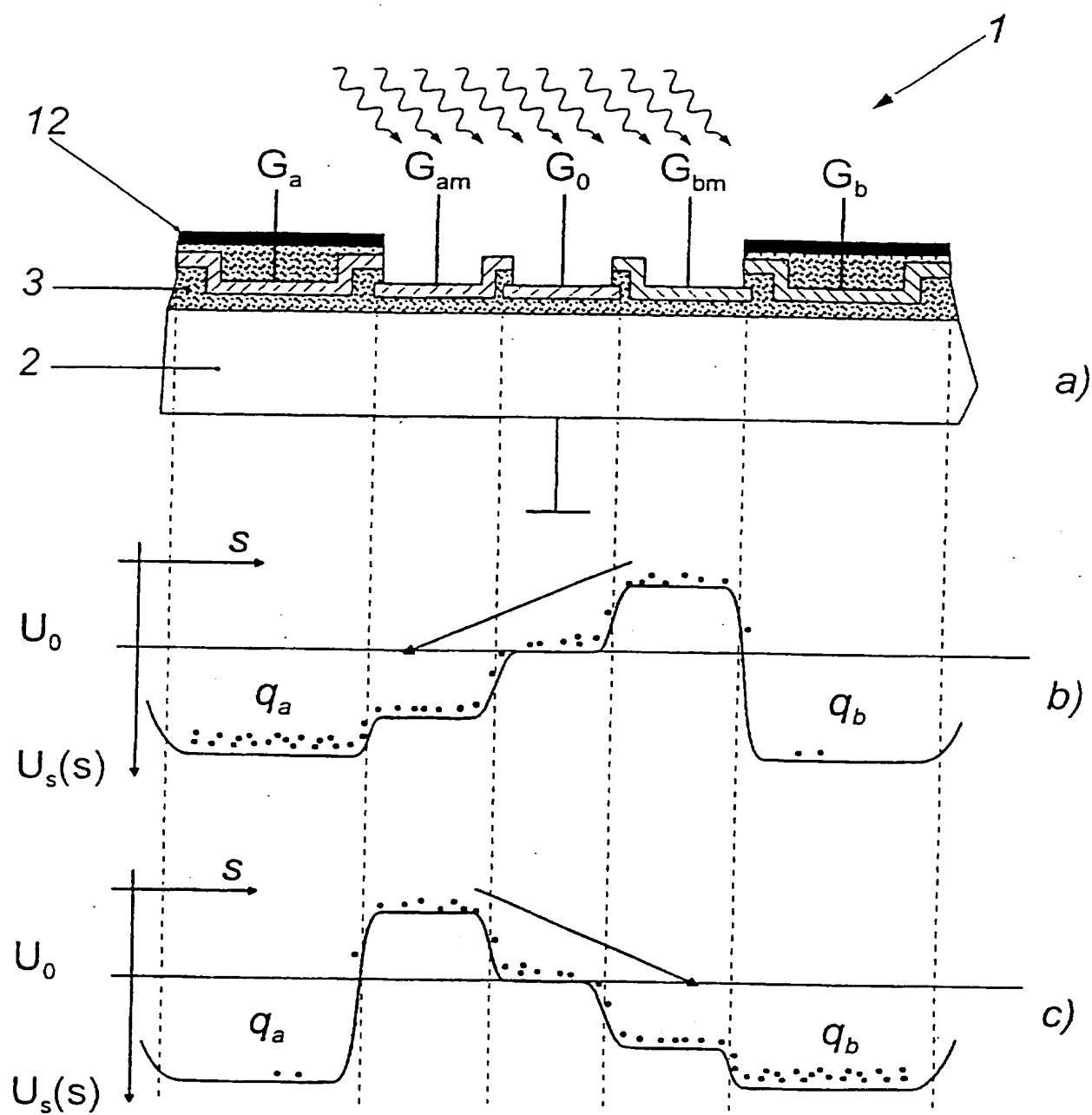


Fig. 6

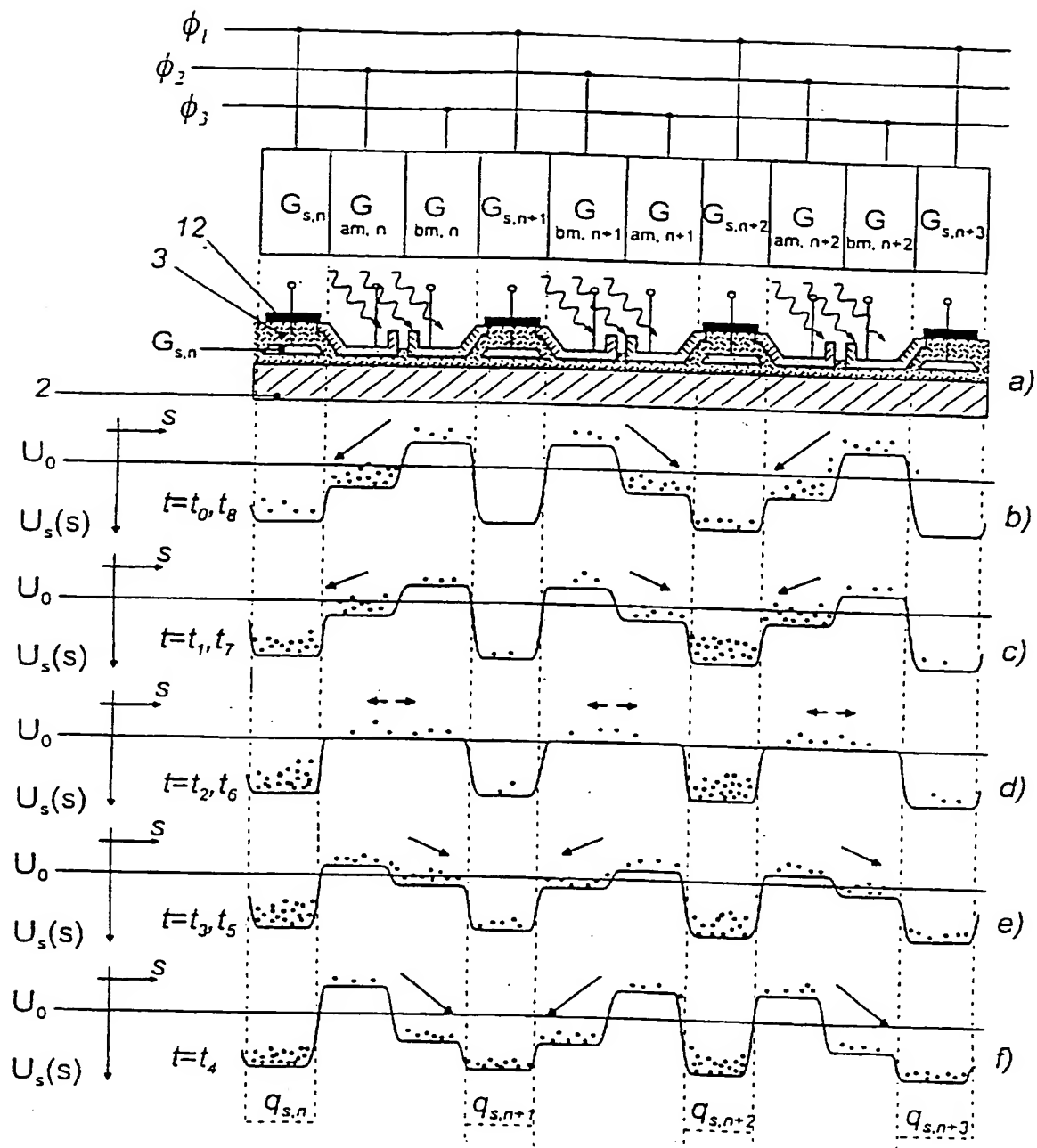


Fig. 7

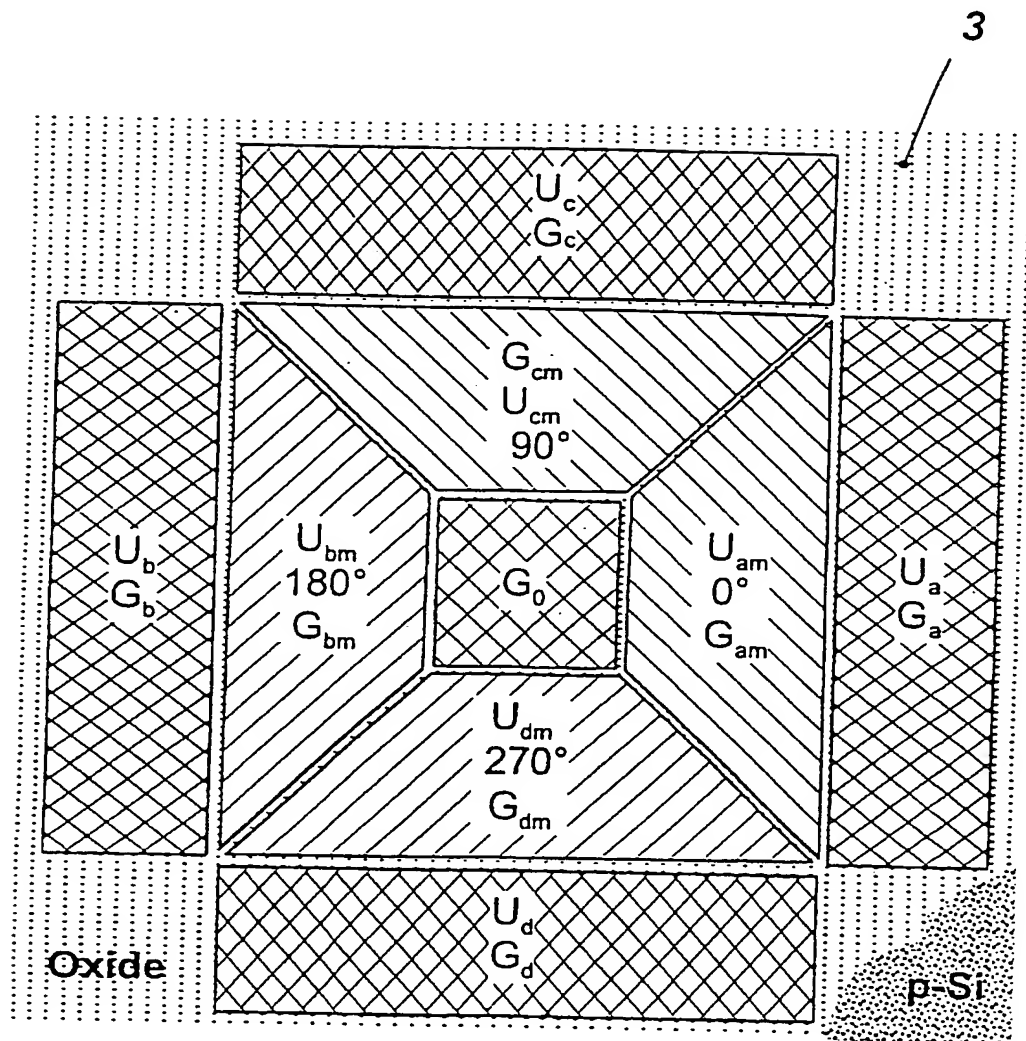


Fig. 9

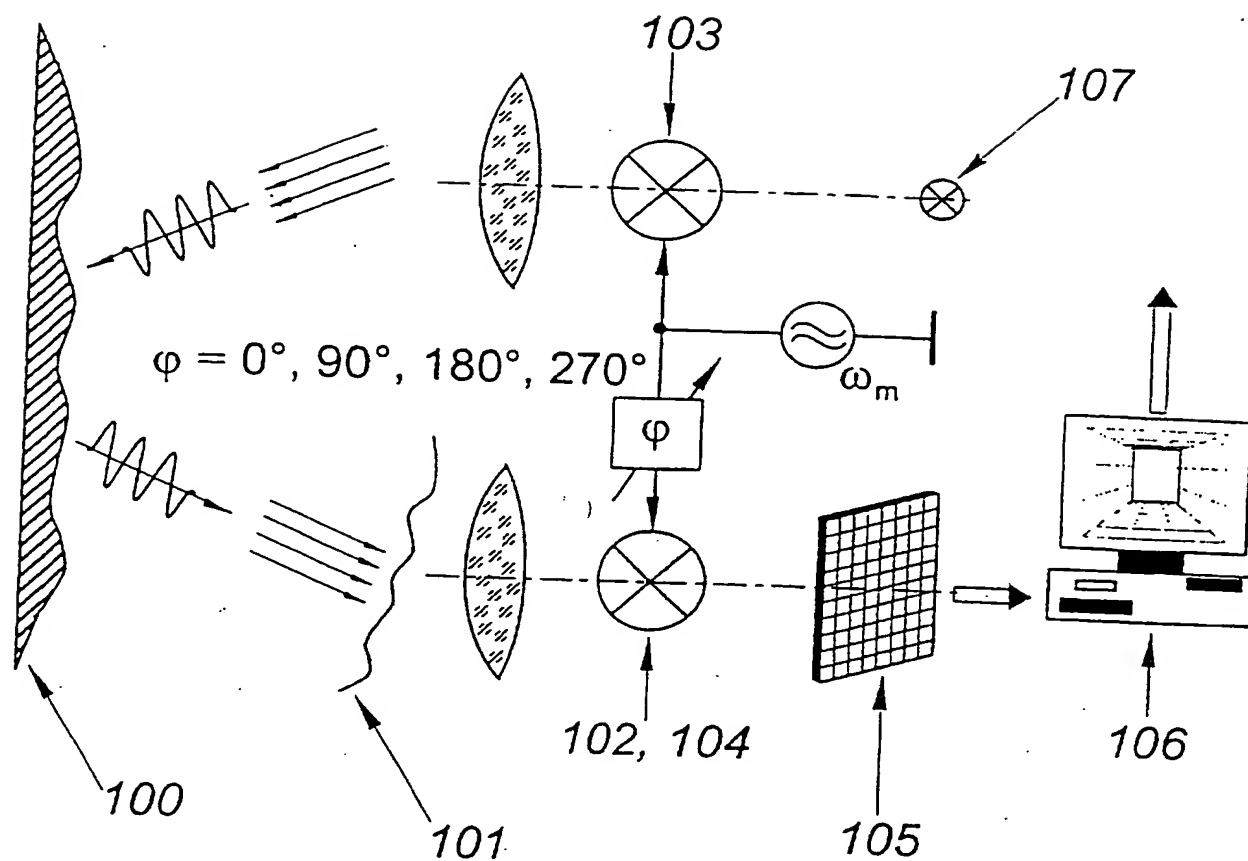


Fig. 10

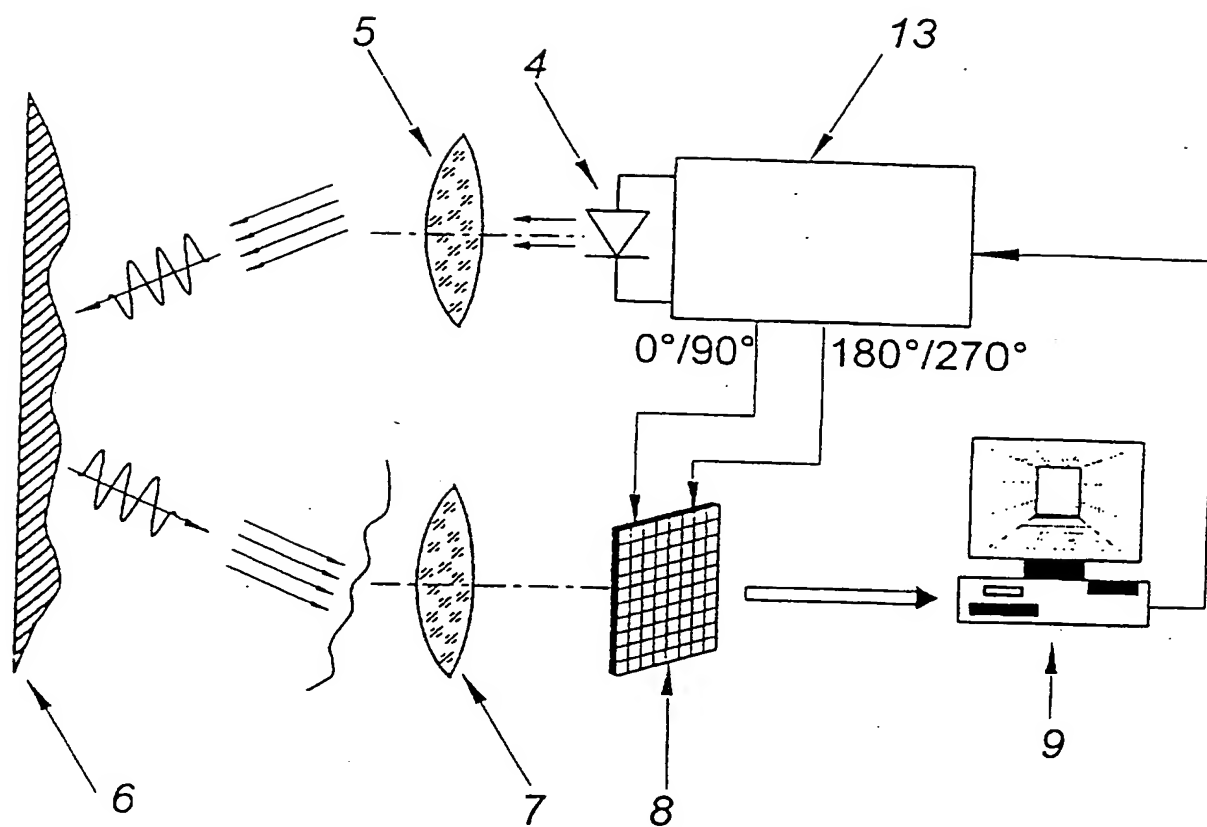


Fig. 11

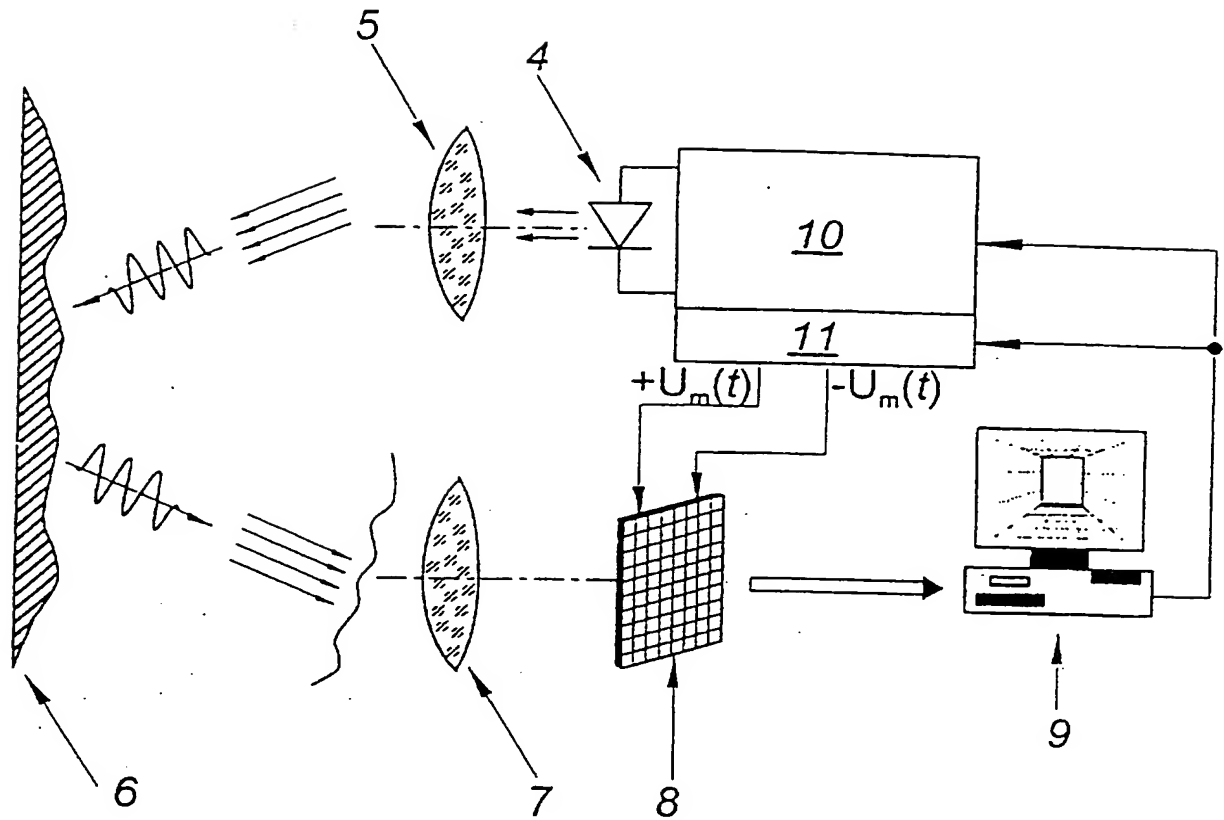


Fig. 12

13/14

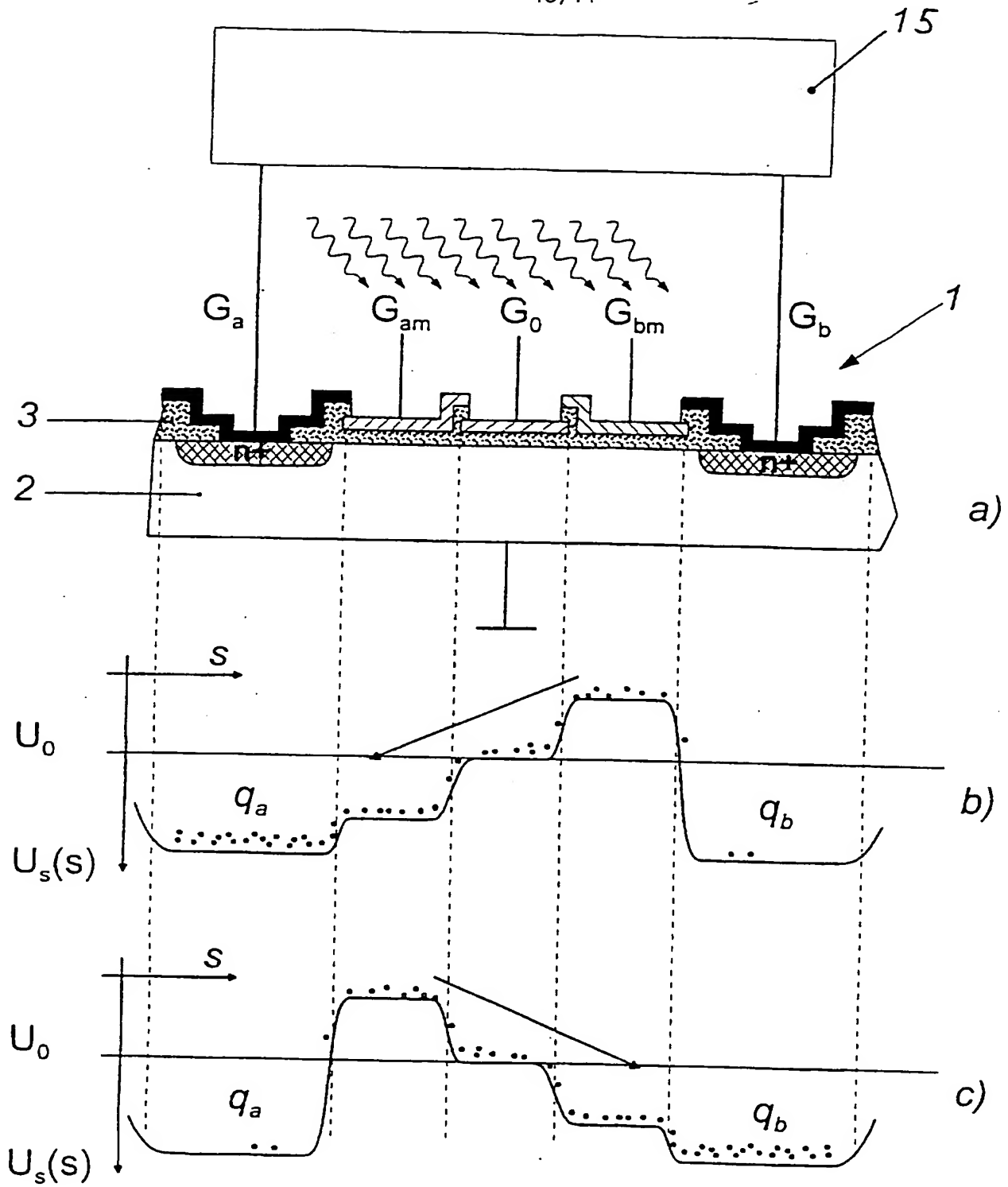


Fig. 13

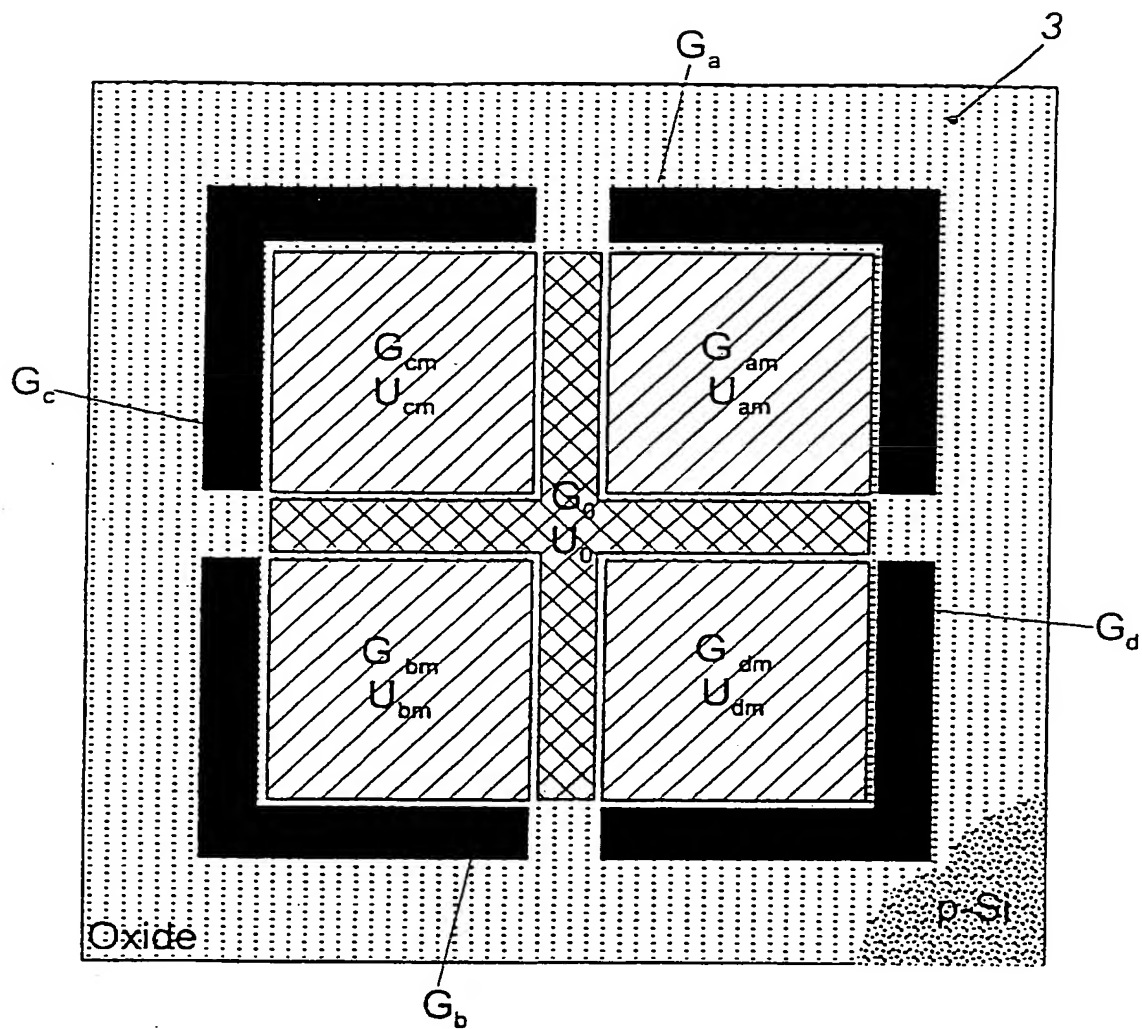


Fig. 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 97/01956

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 6 G01J9/00 G01B11/24 H04N3/15 H01L27/148

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 G01J G01B H04N H01L G01S G01C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	DE 44 39 298 A (SCHWARTE RUDOLF PROF DR ING) 13 June 1996 cited in the application see page 3, line 1 - line 34; claim 1 ---	1,17
Y	SPIRIG T ET AL: "THE LOCK-IN CCD - TWO-DIMENSIONAL SYNCHRONOUS DETECTION OF LIGHT" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, vol. 31, no. 9, 1 September 1995, pages 1705-1708, XP000526180 cited in the application see page 1705 - page 1706 --- -/--	1,17

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

7 January 1998

Date of mailing of the international search report

- 6. 02. 98

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Breusing, J

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 97/01956

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A, P	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 097, no. 003, 31 March 1997 & JP 08 313215 A (OLYMPUS OPTICAL CO LTD), 29 November 1996, see abstract ---	1
A	SUZUKI T ET AL: "REAL-TIME TWO-DIMENSIONAL SURFACE PROFILE MEASUREMENT IN A SINUSOIDAL PHASE-MODULATING LASER DIODE INTERFEROMETER" OPTICAL ENGINEERING, vol. 33, no. 8, 1 August 1994, pages 2754-2758, XP000462289 see the whole document ---	1
A, P	US 5 646 733 A (BIEMAN LEONARD H) 8 July 1997 see column 1 - column 2; figure 1 ---	1
A	EP 0 419 936 A (STEINBICHLER HANS) 3 April 1991 see abstract; figure 1 ---	
A	US 5 381 235 A (INOUE YASUO ET AL) 10 January 1995 see column 1; figures 1,2 -----	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/DE 97/01956

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
DE 4439298 A	13-06-96	NONE	
US 5646733 A	08-07-97	WO 9728421 A	07-08-97
EP 0419936 A	03-04-91	DE 3930632 A	14-03-91
		AT 106557 T	15-06-94
		DE 9017720 U	14-11-91
		DE 59005914 D	07-07-94
		JP 3175327 A	30-07-91
		US 5155363 A	13-10-92
US 5381235 A	10-01-95	JP 2581863 B	12-02-97
		JP 5172539 A	09-07-93

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 97/01956

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 6 G01J9/00 G01B11/24 H04N3/15 H01L27/148

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierte Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 6 G01J G01B H04N H01L G01S G01C

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	DE 44 39 298 A (SCHWARTE RUDOLF PROF DR ING) 13.Juni 1996 in der Anmeldung erwähnt siehe Seite 3, Zeile 1 - Zeile 34; Anspruch 1	1,17
Y	--- SPIRIG T ET AL: "THE LOCK-IN CCD - TWO-DIMENSIONAL SYNCHRONOUS DETECTION OF LIGHT" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Bd. 31, Nr. 9, 1.September 1995, Seiten 1705-1708, XP000526180 in der Anmeldung erwähnt siehe Seite 1705 - Seite 1706 --- -/-	1,17

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

E Älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

L Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

O Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

P Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

T Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

Y Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

Z Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

7. Januar 1998

Abschließdatum des internationalen Recherchenberichts

- 6. 02. 98

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Breusing, J

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A,P	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 097, no. 003, 31.März 1997 & JP 08 313215 A (OLYMPUS OPTICAL CO LTD), 29.November 1996, siehe Zusammenfassung ---	1
A	SUZUKI T ET AL: "REAL-TIME TWO-DIMENSIONAL SURFACE PROFILE MEASUREMENT IN A SINUSOIDAL PHASE-MODULATING LASER DIODE INTERFEROMETER" OPTICAL ENGINEERING, Bd. 33, Nr. 8, 1.August 1994, Seiten 2754-2758, XP000462289 siehe das ganze Dokument ---	1
A,P	US 5 646 733 A (BIEMAN LEONARD H) 8.Juli 1997 siehe Spalte 1 - Spalte 2; Abbildung 1 ---	1
A	EP 0 419 936 A (STEINBICHLER HANS) 3.April 1991 siehe Zusammenfassung; Abbildung 1 ---	
A	US 5 381 235 A (INOUE YASUO ET AL) 10.Januar 1995 siehe Spalte 1; Abbildungen 1,2 -----	

INTERNATIONALER RESEARCHBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE 97/01956

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
DE 4439298 A	13-06-96	KEINE	
US 5646733 A	08-07-97	WO 9728421 A	07-08-97
EP 0419936 A	03-04-91	DE 3930632 A	14-03-91
		AT 106557 T	15-06-94
		DE 9017720 U	14-11-91
		DE 59005914 D	07-07-94
		JP 3175327 A	30-07-91
		US 5155363 A	13-10-92
US 5381235 A	10-01-95	JP 2581863 B	12-02-97
		JP 5172539 A	09-07-93

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☒ FADED TEXT OR DRAWING

☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.